



Leistungsfähigkeit zwei- streifiger Kreisel

Capacité des giratoires à deux voies de circulation

Capacity of two-lane roundabouts

**ETH Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule
Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT)
Prof. H.P. Lindenmann
Prof. P. Spacek
N. Leemann, dipl. Bau-Ing. ETH**

**SNZ Ingenieure und Planer
I. Belopitov, dipl. Ing.
Dr. M. Shojaati, dipl. Ing. ETH**

**Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum (RUB)
Prof. Dr.-Ing. W. Brilon
Dipl.-Ing. A. Geppert**

**Forschungsauftrag VSS 2005/301 auf Antrag des
Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en).
Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes.
Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade.
Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) appointed by the Swiss federal roads authority.
Supply: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Leistungsfähigkeit zwei- streifiger Kreisel

Capacité des giratoires à deux voies de circulation

Capacity of two-lane roundabouts

**ETH Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule
Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT)
Prof. H.P. Lindenmann
Prof. P. Spacek
N. Leemann, dipl. Bau-Ing. ETH**

**SNZ Ingenieure und Planer
I. Belopitov, dipl. Ing.
Dr. M. Shojaati, dipl. Ing. ETH**

**Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum (RUB)
Prof. Dr.-Ing. W. Brilon
Dipl.-Ing. A. Geppert**

**Forschungsauftrag VSS 2005/301 auf Antrag der
Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Prof. H.P. Lindenmann, IVT ETH Zürich

Mitglieder

Prof. Dr.-Ing. W. Brilon, RUB

Prof. P. Spacek, IVT ETH Zürich

N. Leemann, IVT ETH Zürich

T. Weber, IVT ETH Zürich

T. Geppert, RUB

I. Belopitov, SNZ

M. Shojaati, SNZ

Federführende Fachkommission

Fachkommission 3: Verkehrstechnik

Begleitkommission

Präsident

Dr. F. Gallati, Kantonsingenieur Schwyz

Mitglieder

Th. Koy, Rapp Trans AG, Basel

H. Kaul, Rudolf Keller & Partner, Verkehrsingenieure AG, Muttenz

P. Maillard, Robert-Grandpierre et Rapp SA, Lausanne

Dr. P. Pitzinger, Ingenieurbüro Pitzinger, Zürich

R. Siegrist, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern

A. König, Amt für Verkehr, Volkswirtschaftsdirektion Kanton Zürich

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleuten, VSS

Bezugsquelle

Schweizerischer verband der Strassen- und Verkehrsfachleuten, VSS, Sihlquai 255,
8005 Zürich

Inhaltsverzeichnis

Impressum	3
Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	3
1 Einleitung	3
1.1 Auftrag.....	3
1.1.1 Ausgangslage	3
1.1.2 Fragestellung	3
1.1.3 Forschungsstellen	3
1.2 Kenntnisstand Leistungsfähigkeit und Verkehrssicherheit	3
1.2.1 Bemessungszusammenhänge Schweiz	3
1.2.2 Bemessungszusammenhänge in Deutschland.....	3
1.2.3 Verkehrssicherheit Schweiz.....	3
1.2.4 Verkehrssicherheit Deutschland	3
1.3 Ziele	3
1.3.1 Forschungsziele	3
1.3.2 Umsetzung der Resultate für die Praxis	3
1.4 Begriffe und Abkürzungen	3
2 Vorgehen und Methodik	3
2.1 Grundsatz.....	3
2.2 Auswahl der Untersuchungsobjekte	3
2.3 Erhebungs- und Auswertungsmethodik Verkehrsablauf	3
2.3.1 Videoerfassung des Verkehrsablaufs	3
2.3.2 Auswertung der Videaufzeichnungen der Einfahrten	3
2.3.3 Leistungsfähigkeit Einfahrten, Regressionsanalyse Verkehrsmengen.....	3
2.3.4 Leistungsfähigkeit Einfahrten, Analyse Zeitlücken	3
2.3.5 Einfluss Fussgänger.....	3
2.3.6 Kapazität Ausfahrten.....	3
2.4 Erfassung und Auswertung Unfallgeschehen.....	3
2.4.1 Unfall- und Verkehrsdaten	3
2.4.2 Unfallkenngrössen	3
2.4.3 Unfalltypen und Örtlichkeit	3
3 Ergebnisse	3
3.1 Leistungsfähigkeit der Einfahrten aus Regression	3
3.1.1 Vorbemerkungen.....	3
3.1.2 Leistungsfähigkeit zweistreifiger Einfahrten.....	3
3.1.3 Einfluss des Aussendurchmessers auf die Leistungsfähigkeit	3
3.1.4 Einfluss der Fahrstreifensignalisation auf die Leistungsfähigkeit	3
3.1.5 Einfluss der Verkehrsverteilung in der Einfahrt auf die Leistungsfähigkeit	3
3.1.6 Einfluss eines Bypasses auf die Leistungsfähigkeit	3
3.2 Leistungsfähigkeit der Einfahrten aus der Zeitlückentheorie.....	3
3.2.1 Vorbemerkungen.....	3
3.2.2 Leistungsfähigkeit nach Sieglöcher-Formel	3
3.2.3 Leistungsfähigkeit nach Wu-Formel.....	3
3.2.4 Leistungsfähigkeit nach Brilon	3
3.2.5 Vergleich der Ansätze zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit mit Hilfe der Zeitlückentheorie.....	3

3.3	Leistungsfähigkeit ein- und zweistreifiger Ausfahrten.....	3
3.4	Unfallgeschehen zweistreifiger Kreisel	3
3.4.1	Vorbemerkungen.....	3
3.4.2	Unfall- und Verunfalltenhäufigkeit	3
3.4.3	Örtliche Verteilung der Unfälle	3
3.4.4	Unfalltypen	3
3.4.5	Unfallbeteiligte.....	3
3.4.6	Unfallziffer.....	3
4	Bewertung der Ergebnisse.....	3
4.1	Leistungsfähigkeit der Einfahrten.....	3
4.1.1	Vergleich der Methoden zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit der Einfahrten	3
4.1.2	Gegenüberstellung mit den Betriebsformen 1/1 und 2/1+	3
4.2	Leistungsfähigkeit der Ausfahrten.....	3
4.3	Unfallgeschehen	3
5	Erkenntnisse und Folgerungen	3
5.1	Vorbemerkungen.....	3
5.1.1	Auswahl der Untersuchungsobjekte.....	3
5.1.2	Erfassung des Grenzbereichs der Leistungsfähigkeit der Einfahrten.....	3
5.1.3	Wahl des Bemessungszusammenhanges	3
5.1.4	Form des Bemessungszusammenhangs.....	3
5.1.5	Bestimmung des Sicherheitsniveaus	3
5.2	Leistungsfähigkeit	3
5.2.1	Leistungsfähigkeit der Einfahrten.....	3
5.2.2	Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrten	3
5.2.3	Leistungsfähigkeit der Ausfahrten.....	3
5.3	Verkehrssicherheit zweistreifiger Kreisel	3
5.3.1	Allgemeines.....	3
5.3.2	Absolute Unfallkenngrößen.....	3
5.3.3	Relative Unfallkenngrößen.....	3
6	Empfehlungen	3
6.1	Allgemeine Empfehlungen	3
6.1.1	Einsatzbereich zweistreifiger Kreisel.....	3
6.1.2	Gestaltung zweistreifiger Kreisel.....	3
6.2	Normung.....	3
6.3	Weiterer Forschungsbedarf.....	3
	Anhang	3
	Literaturverzeichnis	3
	Projektabschluss.....	3
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen.....	3

Zusammenfassung

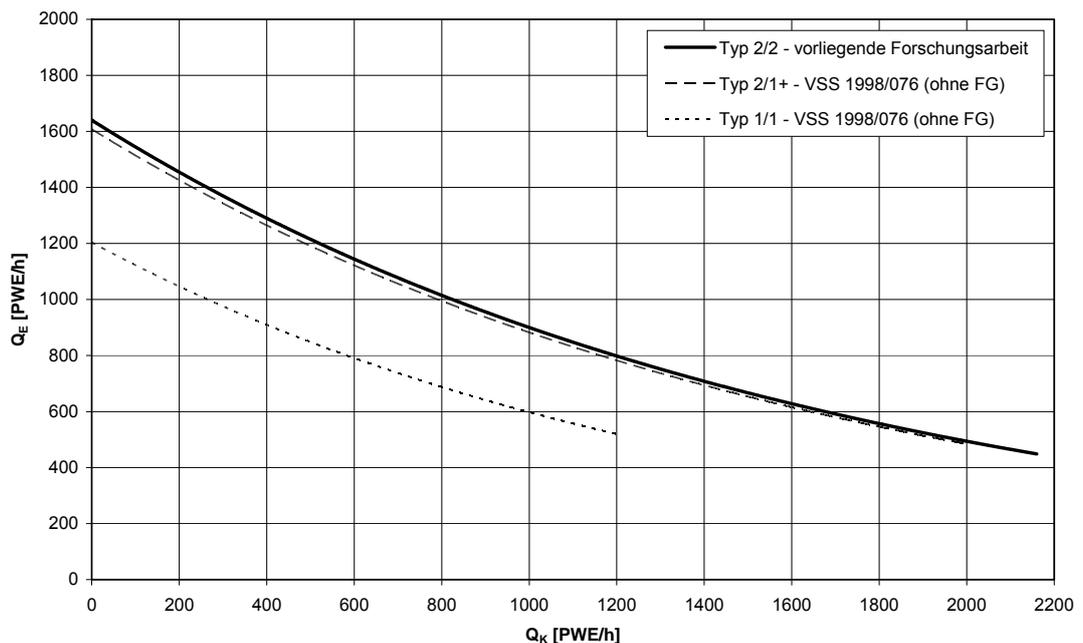
Anlass der Untersuchung und Fragestellung

Die Norm „Knoten mit Kreisverkehr“ SN 640 024a ist Bestandteil der Normgruppe Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit. Sie enthält Angaben zur verkehrstechnischen Dimensionierung und zur Beurteilung des Verkehrsablaufs an Knoten mit Kreisverkehr für Kreiseltypen 1/1 (einstreifige Einfahrt mit einstreifiger Kreisfahrbahn) und 2/1+ (zweistreifige Einfahrt mit einstreifiger, überbreiter Kreisfahrbahn). Für Kreisel mit zweistreifigen Einfahrten und zweistreifiger Kreisfahrbahn (Typ 2/2) fehlte in der Schweiz bisher ein entsprechender Bemessungszusammenhang.

Mit der vorliegenden Forschungsarbeit sollte eine Bemessungsgrundlage für zweistreifige Kreisel als Ergänzung der bestehenden Norm SN 640 024a erarbeitet werden. Neben der Bestimmung der Gesamtleistungsfähigkeit sollte die Frage bezüglich der Zweckmässigkeit von Fahrstreifensignalisationen und -markierung in zweistreifigen Kreiseinfahrten geklärt werden. Schliesslich galt es das Sicherheitsniveau von zweistreifigen Kreiseln zu bestimmen und im Vergleich mit einstreifigen Kreiseln zu beurteilen.

Leistungsfähigkeit Einfahrten

Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich des in der vorliegenden Forschungsarbeit erarbeiteten Bemessungszusammenhanges für den Kreiseltyp 2/2 mit den Zusammenhängen (exponentieller Ansatz) für die Kreiseltypen 2/1+ und 1/1.



Zweistreifige Einfahrten zweistreifiger Kreisel haben bei kleineren Verkehrsmengen auf der Kreisfahrbahn im Mittel eine um ca. 25 % höhere und bei mittleren und höheren Verkehrsbelastungen auf der Kreisfahrbahn eine um ca. 30 % höhere Leistungsfähigkeit. Bei mittleren und höheren Verkehrsbelastungen auf der Kreisfahrbahn entspricht dies absolut etwa 300 PWE/h. Nicht erwartungsgemäss, jedoch sehr vorteilhaft erweist sich dabei, dass auch bei hoher Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn deutlich mehr Fahrzeuge einfahren können als bei einstreifigen Kreiseln.

Zwischen den Betriebsformen 2/1+ und 2/2 bestehen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der Einfahrten praktisch keine Unterschiede. D.h. es sind keine Unterschiede zu erkennen, ob eine überbreite einstreifige Kreisfahrbahn oder eine mit zwei Fahrstreifen markierte Kreisfahrbahn vorhanden ist.

Verkehrssicherheit zweistreifiger Kreisel

Entgegen bisheriger Vermutungen führte die vorliegende Untersuchung zum Unfallgeschehen zweistreifiger Kreisel zur Erkenntnis, dass das Sicherheitsniveau zweistreifiger Kreisel etwa gleich ist wie jenes einstreifiger Kreisel. Zwar ereignen sich an zweistreifigen Kreiseln absolut mehr Unfälle als an einstreifigen Kreiseln, die Unfallziffer, d.h. die Zahl der Unfälle bezogen auf die im Kreisel erbrachte Verkehrsleistung (Summe aller einfahrenden Fahrzeuge), ist beinahe gleich.

Die folgende Tabelle zeigt Vergleichswerte von Unfallziffern für Kreisel verschiedener Betriebsformen.

Quelle	Kreiseltyp 1/1	Kreiseltyp 2/1+	Kreiseltyp 2/2
Vorliegende Forschungsarbeit			0.42 U/10 ⁶ Fz
Lindenmann, 2004		0.43 U/10 ⁶ Fz	
Bühlmann, 1997	0.44 U/10 ⁶ Fz		
Brilon, 2004			0.63 U/10 ⁶ Fz
Matthews, 2009		0.54 U/10 ⁶ Fz	

Es zeigte sich aber, dass zwischen einzelnen zweistreifigen Kreisel relativ grosse Unterschiede des Sicherheitsniveaus vorhanden sind. Aus diesem Grund muss eine Anordnung eines zweistreifigen Kreisels sorgfältig überlegt und insbesondere aufgrund einer Leistungsanalyse beurteilt werden.

Einsatzbereich und Gestaltung zweistreifiger Kreisel

Die vorliegende Forschungsarbeit lässt nebst den Erkenntnissen der Leistungsfähigkeit und Verkehrssicherheit folgende Empfehlungen bezüglich Einsatzbereich und Gestaltung zweistreifiger Kreisel zu. Generell sollte bei der Wahl der Betriebsform folgendes beachtet werden:

- Die Anwendung zweistreifiger Kreisel soll dann geprüft werden, wenn dies aus Leistungsgründen als zweckmässig beurteilt werden kann.
- Bei begrenzten Platzverhältnissen ist die Anwendung der Betriebsform 2/1+, also statt zweistreifig markierter, die einstreifig überbreit ausgebildete Kreisfahrbahn zu prüfen. Deren zweckmässiger Einsatz liegt bei Aussendurchmessern von ca. 30 bis 40 m.
- Der Einsatz der zweistreifig markierten Kreisel ist erst ab einem Aussendurchmesser von 35 m angezeigt. Zweistreifige Kreisel mit Aussendurchmessern grösser als 50 m führen bei mittleren und hohen Verkehrsmengen auf der Kreisfahrbahn zu keiner Leistungssteigerung in den Einfahrten.

Die betriebliche und geometrische Ausgestaltung zweistreifiger Kreisel ist sorgfältig zu planen. Es sind dabei folgende Grundsätze zu berücksichtigen:

- Bei zweistreifig markierten Kreisel sind zweistreifige Einfahrten nur dort anzuordnen, wo dies aus Leistungs- und Verkehrsqualitätsgründen (Rückstau) erforderlich ist. Ansonsten ist aus Gründen der Verkehrssicherheit einer einstreifigen Einfahrt zu bevorzugen.
- Bei der Anordnung von Fahrstreifensignalisationen und -markierungen in zweistreifigen Zufahrten ist Zurückhaltung angezeigt. Wie die vorliegende Untersuchung ergab, lässt sich damit die Belastung des linken Fahrstreifens nicht in jedem Fall verbessern.
- Die Leistungsfähigkeit gemäss dem Bemessungszusammenhang wird bei ungefähr gleichmässiger Belastung der beiden Fahrstreifen in der Einfahrt (50 % ± 10 %) erreicht. Bei deutlicheren Unterschieden der Belastungen der Fahrstreifen lässt sich die angegebene Leistungsfähigkeit nicht erreichen.
- Die Ausfahrten aus zweistreifigen Kreiseln sind aus Verkehrssicherheitsgründen einstreifig zu gestalten.

Schliesslich sei hier der Dank für die Unterstützung der Untersuchungen an die Tiefbauämter und Polizeidienststellen der Kantone Basel-Landschaft, Freiburg, Bern, Waadt, Luzern, St. Gallen, Schwyz, Tessin und Zug ausgesprochen. Die Vertreter dieser Amtsstellen haben den Forschungsstellen die für die vorliegende Forschungsarbeit nötigen Grundlagen zur Situation, zum Verkehr und zum Unfallgeschehen zur Verfügung gestellt.

Résumé

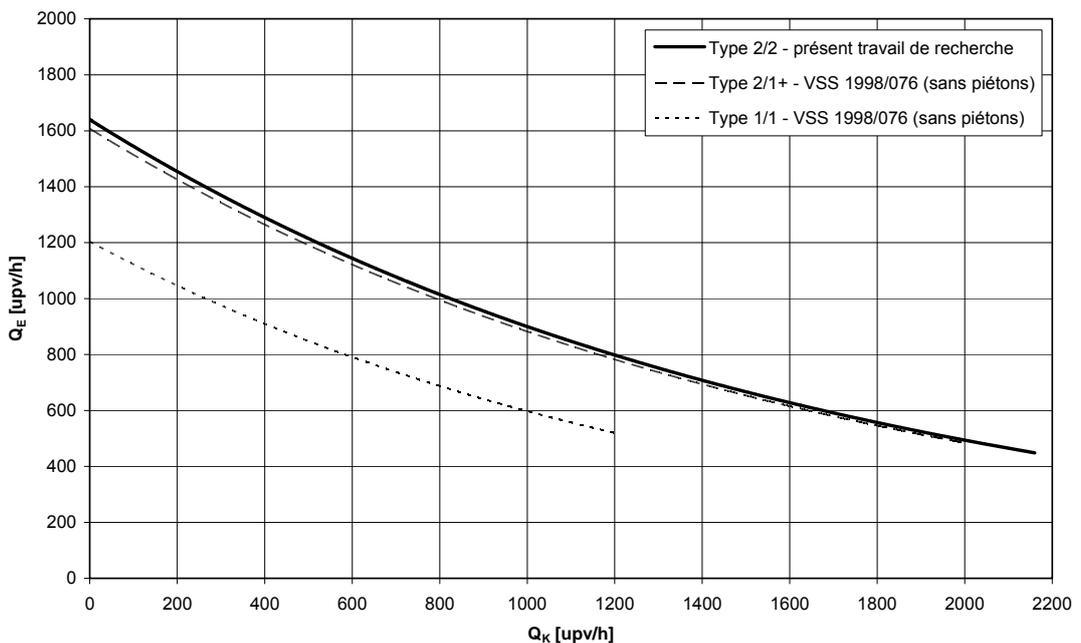
Motif de la recherche et question traitée

La norme „Carrefours giratoires“ SN 640 024a fait partie du groupe de normes Capacité, niveau de service, charges compatibles. Elle contient des informations sur le dimensionnement selon la technique de circulation et sur l'évaluation du trafic aux carrefours giratoires pour les types 1/1 (entrée à une voie avec un anneau de circulation à une voie) et 2/1+ (entrée à deux voies avec un anneau de circulation à une voie large). Jusqu'à présent, un rapport de dimensionnement pour les carrefours giratoires avec des entrées à deux voies et des anneaux de circulation à deux voies (type 2/2) faisait défaut en Suisse.

Le présent travail de recherche avait pour objectif de permettre d'élaborer une base de dimensionnement pour les carrefours giratoires à deux voies afin de compléter la norme SN 640 024a. Parallèlement à la détermination de la capacité globale, la recherche avait pour objet d'évaluer si les signalisations et le marquage des voies de circulation aux entrées de carrefours giratoires à deux voies sont appropriés. Enfin, il s'agissait également de déterminer le niveau de sécurité des carrefours giratoires à deux voies et de l'évaluer en le comparant avec celui des carrefours giratoires à une voie.

Capacité aux entrées

La figure ci-dessous permet de comparer le rapport de dimensionnement élaboré dans le présent travail de recherche pour le type de carrefours giratoires 2/2 aux rapports (approche exponentielle) pour les types de carrefours giratoires 2/1+ et 1/1.



Lorsque les volumes de circulation sont faibles sur l'anneau de circulation, les entrées à deux voies de carrefours giratoires à deux voies ont une capacité d'environ 25 % en moyenne plus élevée en moyenne et une capacité d'environ 30 % plus élevée en cas de débits moyens et élevés sur l'anneau de circulation, cela correspond à environ 300 upv/h (en valeur absolue). De manière inattendue, il a cependant été constaté que même lorsque le débit de circulation est élevé, nettement plus de véhicules peuvent entrer sur l'anneau de circulation que pour les carrefours giratoires à une voie, ce qui est très avantageux.

S'agissant de la capacité des entrées, il n'existe presque pas de différence entre les formes d'exploitation 2/1+ et 2/2, c'est-à-dire entre un anneau de circulation à une voie large et un anneau de circulation à deux voies marquées.

Sécurité du trafic dans les carrefours giratoires à deux voies

Contrairement à ce qui a été supposé jusqu'à présent, la présente recherche portant sur les accidents aux carrefours giratoires à deux voies a mis en évidence que le niveau de sécurité d'un carrefour giratoire à deux voies est à peu près identique à celui d'un carrefour giratoire à une voie. Nettement plus d'accidents se produisent aux carrefours giratoires à deux voies qu'aux carrefours giratoires à une voie, mais le nombre d'accidents, à savoir le nombre d'accidents par rapport à la performance de trafic dans le carrefour giratoire (somme de tous les véhicules entrant dans le carrefour), est presque identique.

Le tableau indique des valeurs comparatives d'indices relatifs aux accidents pour des carrefours giratoires de formes d'exploitation diverses.

Source	Type de carrefour giratoire 1/1	Type de carrefour giratoire 2/1+	Type de carrefour giratoire 2/2
Présente recherche			0.42 A/10 ⁶ V
Lindenmann, 2004		0.43 A/10 ⁶ V	
Bühlmann, 1997	0.44 A/10 ⁶ V		
Brilon, 2004			0.63 A/10 ⁶ V
Matthews, 2009	0.54 A/10 ⁶ V		

Il a cependant été constaté qu'il existe des différences assez importantes de niveau de sécurité entre les carrefours giratoires à deux voies. La décision de mettre en place un carrefour giratoire à deux voies doit donc faire l'objet d'une réflexion approfondie et être évaluée sur la base d'une analyse des performances.

Domaine d'application et aménagement des carrefours giratoires à deux voies

En complément des connaissances acquises sur la capacité et la sécurité du trafic, le présent travail de recherche permet de formuler les recommandations suivantes quant au domaine d'application et à l'aménagement de carrefours giratoires à deux voies. D'une manière générale, il faut tenir compte de ce qui suit lors du choix de la forme d'exploitation:

- L'utilisation de carrefours giratoires à deux voies doit être évaluée si elle peut être considérée comme adéquate en termes de performance.
- Lorsque la place est limitée, il faut également évaluer l'utilisation de la forme d'exploitation 2/1+, à savoir un anneau de circulation à une voie large au lieu d'un anneau à deux voies marquées. Dont l'utilisation appropriée se trouve d'un diamètre extérieur environ de 30 m à 40 m.
- L'utilisation des carrefours giratoires à deux voies marquées n'est raisonnable que d'une diamètre extérieur de 35 m. Les carrefours giratoires à deux voies avec un diamètre extérieur plus que 50 m ne permette pas d'augmenter la capacité de l'entrée dans le domaine de débits moyens à élevés sur l'anneau de circulation.

La configuration géométrique et d'exploitation de carrefours giratoires à deux voies doit être soigneusement planifiée. Pour ce faire, les principes suivants sont à prendre en compte:

- Des entrées à deux voies doivent être aménagées aux endroits où elles sont nécessaires en termes de performance et de niveau de service (files d'attente). Si elles ne sont pas indispensables, il est préférable de planifier une entrée à une voie pour des raisons de sécurité.
- Il vaut mieux faire preuve de retenue quant à la mise en place de signalisations et de marquages des voies de circulation, car ils ne permettent pas toujours d'améliorer le débit de la voie de gauche.
- Pour atteindre les capacités mentionnées dans cette recherche, il faut que la charge de trafic des deux voies d'entrée soit égale (50 % ± 10 %). Avec des différences plus claires des charges de trafic de deux voies d'entrée la capacité indiquée ne peut pas être atteinte.

- Les sorties de carrefours giratoires à deux voies – qui ne génèrent qu'une augmentation faible de la capacité – doivent être à une voie pour des raisons de sécurité du trafic.

Enfin, des remerciements sont adressés aux services de ponts et chaussées et aux postes de police des cantons de Bâle-Campagne, Fribourg, Berne, Vaud, Lucerne, St-Gall, Schwyz, Tessin et Zoug pour leur collaboration à ce travail de recherche. En effet, les représentants de ces services ont, de manière désintéressée, mis à disposition des centres de recherche les informations de base nécessaires quant à la situation des carrefours giratoires, au trafic et aux accidents.

Summary

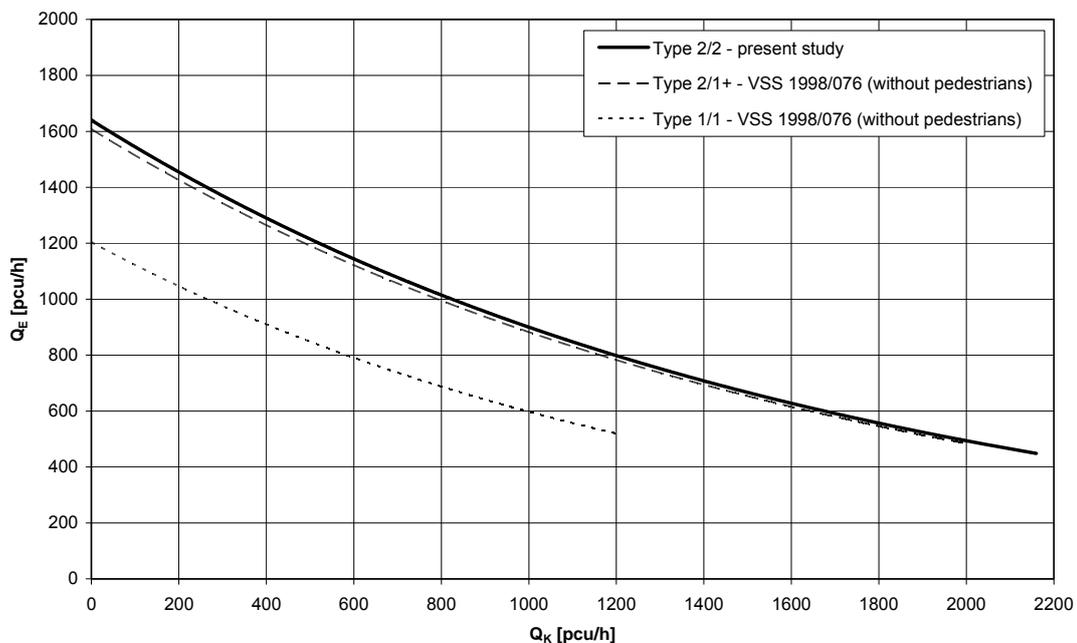
Reason for research and objectives

The standard „Roundabouts“ SN 640 024a is a component of the group of standards Efficiency, Traffic Quality and Capacity. It contains data for traffic dimensioning and for the evaluation of the traffic flow at roundabouts of type 1/1 (one entry lane and one circulatory lane) and type 2/1+ (two entry lanes and one extra-wide circulatory lane).

The main objective of the present research is to work out the basic principles of dimensioning of two-lane roundabouts in order to complete the standard SN 640 024a. Apart from the determination of the total capacity, the research had the aim of evaluating if signposts and direction-indicating pavement markings at two-lane entries are appropriate. Finally also the level of traffic safety at two-lane roundabouts should be determined and be compared with that of one-lane roundabouts.

Entry Capacity

The following figure shows the comparison of the dimensioning correlation for roundabouts 2/2 of the present research work with the correlations (exponential approach) for roundabouts 2/1+ and 1/1.



In case of low traffic volumes on the circulatory roadway the capacity of a two-lane entry (roundabout type 2/2) is in average approximately 25 % higher than the capacity of one-lane entry (type 1/1). In case of mean to high traffic volumes on the circulatory roadway the capacity is in average 30 % higher, this correspond to approx. 300 pcu/h (in absolute value). The curves of capacity of type 1/1 and 2/2 shows also the unexpected bit advantageous result that also in case of high traffic volumes on the circulatory roadway considerable more vehicles can drive in the roundabout than at a one-lane roundabout.

Recording the entry capacity practically no differences between the roundabout types 2/2 and 2/1+ exist, that means between a circulatory roadway with two marked lanes and one, extra wide lane.

Traffic safety of two-lane roundabouts

Contrary to what was supposed until now, the present research relating to the accidents at two-lane roundabouts shows that the security level of a two-lane roundabout is about equal to that of a one-lane roundabout. Definitely more accidents occur at two-lane roundabouts than at one-lane roundabouts, but the mean accident rates, the number of accidents compared to the traffic volume in the roundabout (sum of all the vehicles entering the roundabout), are almost equal.

The following table shows the comparative values of accident rates of different roundabout types.

Reference	Type 1/1	Type 2/1+	Type 2/2
Present research			0.42 A/10 ⁶ V
Lindenmann, 2004		0.43 A/10 ⁶ V	
Bühlmann, 1997	0.44 A/10 ⁶ V		
Brilon, 2004			0.63 A/10 ⁶ V
Matthews, 2009	0.54 A/10 ⁶ V		

It was shown that there exist rather important differences of the level of traffic safety between the individual roundabouts. The decision to build a two-lane roundabout must thus be the subject of a careful reflexion and be evaluated on the basis of an analysis of the performance.

Scope of application and design of two-lane roundabouts

Apart from the findings of capacity and traffic safety the present research work permits the following recommendations of the scope of application and design of two-lane roundabouts. To choose the type of a roundabout following should be considered:

- The use of a two-lane roundabout should be evaluated when it's necessary in terms of performance.
- When the place is limited, the roundabout type 2/1+, that means instead of two marked lanes one, extra wide lane, should also be evaluated. The appropriate use of the type 2/1+ is when the external diameter is between 30 m and 40 m.
- The use of two-lane roundabouts is not reasonable until a diameter of 35 m. Two-lane roundabouts with an external diameter more largely than 50 m does not increase the entry capacity in case of high traffic volumes on the circulatory roadway.

The operational and geometric design of two-lane roundabouts should be planned carefully. Following principles are to be considered:

- Two-lane entries at two-lane roundabouts are to be arranged only when this is necessary in terms of performances and service level (jam). Otherwise a one lane entry is to prefer because of traffic safety.
- Signposts and direction-indicating pavement markings in two-lane entries are to be arranged with caution because the traffic volumes in the left entry can not be increased in every case.
- To reach the entry capacity mentioned in this research it is necessary that the traffic volumes in both entry lanes are approximately equal (50 % ± 10 %). When there are differences more clear between the traffic volumes in both entry lanes the mentioned capacity will not be achieved.
- For reasons of traffic safety, in the exits of two-lane roundabout must be only one lane.

Finally the thanks are addressed to the road authorities and the police stations of the cantons Basle-Land, Fribourg, Berne, Vaud, Lucerne, St. Gallen, Schwyz, Ticino und Zug for the support of the research project with the basic information about the situation of the roundabouts, the traffic volumes and the accident occurrence.

1 Einleitung

1.1 Auftrag

1.1.1 Ausgangslage

Die VSS-Normgruppe „Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit“ besteht aus sieben Normen. Die Norm „Knoten mit Kreisverkehr“ SN 640 024a [1] ist Bestandteil dieser Normgruppe. Sie enthält Angaben zur verkehrstechnischen Dimensionierung und zur Beurteilung des Verkehrsablaufs an Knoten mit Kreisverkehr für die Kreiseltypen 1/1 (einstreifige Einfahrt mit einstreifiger Kreisfahrbahn) und 2/1+ (zweistreifige Einfahrten mit einstreifiger, überbreiter Kreisfahrbahn) basierend auf den Erkenntnissen der Forschungsarbeit „Leistungsfähigkeit hochbelasteter Kreisel (Grundlagen)“ [2]. Für Kreisel mit zweistreifigen Einfahrten und zweistreifiger Kreisfahrbahn (Typ 2/2) wurde in der Schweiz bis heute noch keine für die Formulierung eines Bemessungszusammenhangs hinreichende Untersuchung durchgeführt.

Aufgrund der starken Zunahme von zweistreifigen Kreiseln in der Schweiz sind Angaben zur möglichen Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Kreiseln des Typs 2/2 gegenüber einstreifigen Kreiseln herzuleiten. In diesem Zusammenhang bestehen bei zweistreifigen Kreiseln Unklarheiten hinsichtlich Fahrstreifensignalisation und -markierung. Zudem wird häufig die Ansicht vertreten, dass zweistreifige Kreisel mit zweistreifigen Einfahrten eine ungenügende Verkehrssicherheit, vor allem im Vergleich zu einstreifigen Kreiseln (Typ 1/1), aufweisen.

1.1.2 Fragestellung

Mit der Forschungsarbeit ist eine Grundlage für die Bemessung von zweistreifigen Kreiseln als Ergänzung zur bestehenden Norm SN 640 024a zu erarbeiten. Neben der Bestimmung der Gesamtleistungsfähigkeit, sind die Fragen bezüglich der Zweckmässigkeit von Fahrstreifensignalisationen und -markierung bei zweistreifigen Kreiseln zu klären. Schliesslich ist das Sicherheitsniveau von zweistreifigen Kreiseln zu bestimmen und im Vergleich mit einstreifigen Kreiseln zu beurteilen, mit dem Zweck, entsprechende Folgerungen abzuleiten.

1.1.3 Forschungsstellen

Für die Durchführung der vorliegenden Forschungsarbeit wurden die Forschungsstellen beauftragt:

- Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich,
- Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum (RUB) und
- Ingenieurbüro SNZ Ingenieure und Planer (SNZ)

Für die Durchführung des Forschungsauftrages wurde die folgende Aufteilung vorgenommen:

- | | |
|---|----------|
| • Evaluation der Untersuchungsobjekte und Beschaffung Plangrundlagen: | SNZ |
| • Videoaufnahmen des Verkehrsablaufs bei allen Untersuchungsobjekten: | SNZ |
| • Auswertung und Analyse Verkehrsmengen (Regressionen) und Zeitlücken (Grenz- und Folgezeitlücken): | IVT, RUB |
| • Auswertung des Unfallgeschehens: | IVT |
| • Bewertung und Beurteilung der Ergebnisse, Herleitung von Erkenntnissen und Folgerungen: | IVT, RUB |

Am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich wurden eine Masterarbeit [3] sowie eine Projektarbeit [4] zum Thema Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisell durchgeführt.

1.2 Kenntnisstand Leistungsfähigkeit und Verkehrssicherheit

1.2.1 Bemessungszusammenhänge Schweiz

Eine erste Bemessungsgrundlage für Kreisell basierend auf dem Regressionsverfahren wurde in der Schweiz Mitte der 80er Jahre mit empirischen Untersuchungen im Rahmen des Forschungsauftrages VSS 3/89 hergeleitet [5].

In der Forschungsarbeit „Leistungsfähigkeit hochbelasteter Kreisell (Grundlagen)“ VSS 1998/076 [2] wurde der vorhandene Zusammenhang für einstreifige Kreisell überprüft und zusätzlich ein Bemessungszusammenhang für einstreifige Kreisell mit überbreiter Kreisellbahn hergeleitet. Die Resultate dieser Arbeit wurden im Jahr 2005 in die überarbeitete Norm SN 640 024a aufgenommen. Die folgende Abbildung zeigt die Bemessungszusammenhänge für die Kreiselltypen 1/1 und 2/1+ gemäss SN 640 024a [1].

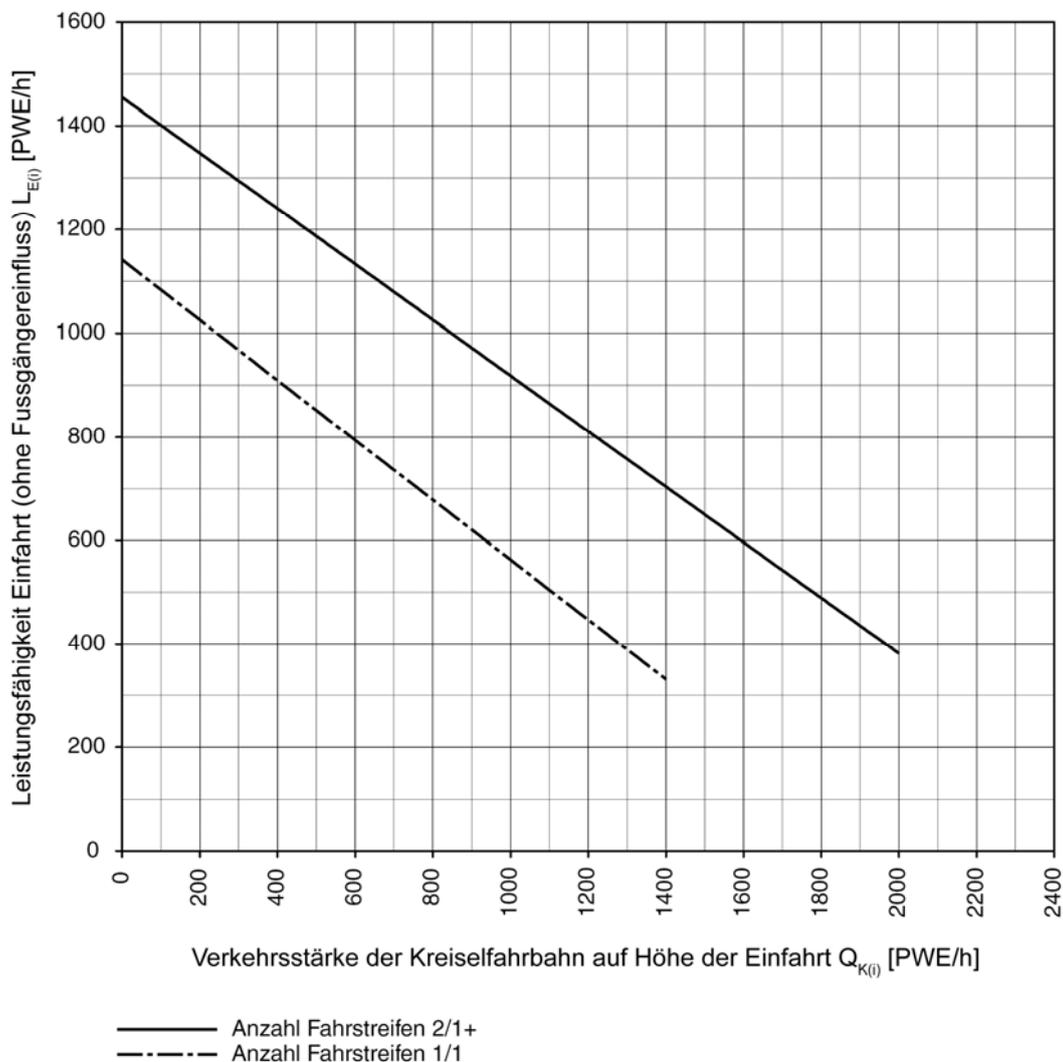


Abb. 1.1 Bemessungszusammenhang nach SN 640 024a [1]

1.2.2 Bemessungszusammenhänge in Deutschland

Während in vielen europäischen Ländern, vor allem auch in Deutschland, seit Anfang der 90er Jahre bei höheren Verkehrsbelastungen zweistreifige Kreisel bereits realisiert wurden, wurde diese Betriebsform in der Schweiz nur in Ausnahmefällen gebaut (z.B. in Sihlbrugg). Zur Klärung der Leistungsfähigkeit und Sicherheit wurden deshalb u.a. in Deutschland entsprechende Untersuchungen durchgeführt ([6] bzw. [7]). Dies auch mit dem Ziel, Grundlagen für die Planung und Bemessung solcher Anlagen bereitzustellen [8]. Im Jahr 2006 publizierte die FGSV ein auf dieser Untersuchung basierendes Merkblatt [9], welches Differenzen zum HBS 2001 aufwies. Im Jahr 2008 wurden die offenen Fragen in diesem Zusammenhang durch eine Überprüfung der bestehenden Kapazitätsformeln an der Ruhr-Universität Bochum weitgehend geklärt [10]. Dies führte zur Empfehlung, die Kapazitätsformeln anzupassen. Für die Bemessungszusammenhänge wurden sowohl Ergebnisse aus Regressionsuntersuchungen der Verkehrsmengen als auch Ergebnisse der Zeitlückenverfahren verwendet. Im Folgenden sind die verschiedenen Stationen der Entwicklung generell kurz dargestellt.

Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen (HBS) [8]

Im Handbuch für Bemessung aus Deutschland (HBS 2001) [8] wird der Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke in der Einfahrt und auf der Kreisfahrbahn basierend auf der Zeitlückentheorie wie folgt angegeben.

$$G = 3600 \cdot \left(1 - \frac{t_{\min} \cdot q_k}{n_k \cdot 3600}\right)^{n_k} \cdot \frac{n_z}{t_f} \cdot e^{-\frac{q_k}{3600} \cdot \left(t_g - \frac{t_f}{2} - t_{\min}\right)}$$

G = Grundkapazität der Zufahrt [PWE/h]
 q_k = Verkehrsstärke im Kreis [PWE/h]
 n_k = Anzahl der Fahrstreifen im Kreis [-]
 n_z = Anzahl der Fahrstreifen in der Zufahrt [-]
 t_g = Grenzzeitlücke [s]
 t_f = Folgezeitlücke [s]
 t_{\min} = Mindestzeitlücke zwischen den Fahrzeugen im Kreis [s]

mit $t_g = 4.1$ s, $t_f = 2.9$ s, $t_{\min} = 2.1$ s

Die Bemessungszusammenhänge für die Kreiseltypen 1/1, 1/2 und 2/2 sind in der folgenden Abbildung grafisch dargestellt.

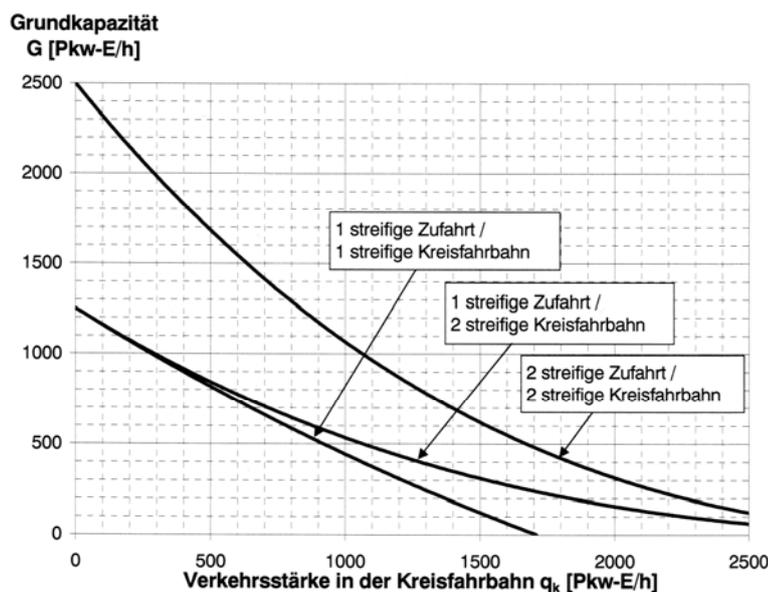


Abb. 1.2 Bemessungszusammenhang nach HBS [8]

Im HBS [8] sind zudem Angaben auf der Basis von [11] zum Einfluss der Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrt vorhanden. Der Einfluss wird mit Hilfe eines Abminderungsfaktors berücksichtigt. Dieser wird für ein- oder zweistreifige Zufahrten in Abhängigkeit der massgebenden Hauptstrombelastung im Kreis abgelesen (Abb. 1.3 und Abb. 1.4). Die Abminderungsfaktoren in der Schweizer Norm (SN 640 024a) wurden aus dem HBS übernommen.

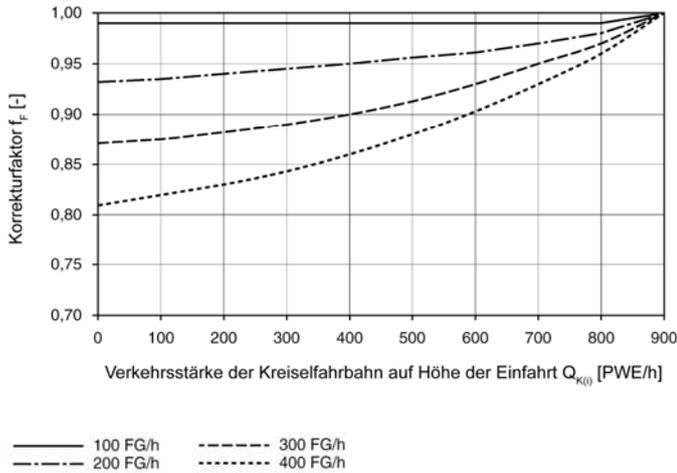


Abb. 1.3 Abminderungsfaktoren für Fussgänger in einstreifigen Einfahrten nach HBS [8], [11]

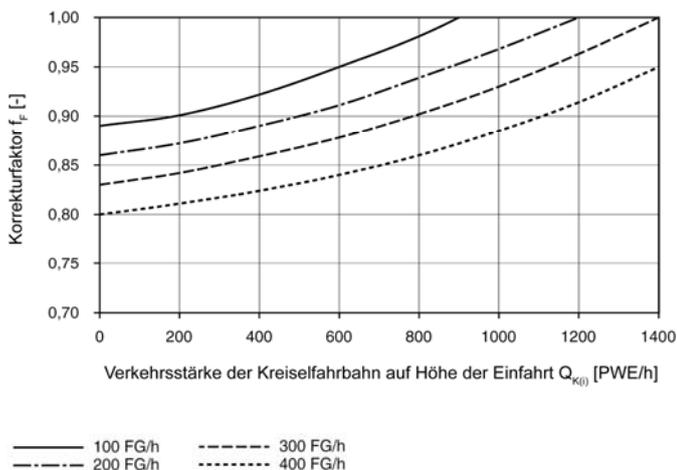


Abb. 1.4 Abminderungsfaktoren für Fussgänger in zweistreifigen Einfahrten nach HBS [8], [11]

Leistungsfähigkeit und Sicherheit zweistreifiger Kreisel nach Brilon (2004) [7]

Bei der Forschungsarbeit „Überprüfung von Kreisverkehren mit zweistreifig markierter oder einstreifig markierter, aber zweistreifig befahrbarer Kreisfahrbahn“ [7] wurden deutlich tiefere Leistungsfähigkeiten ermittelt als die Bemessungszusammenhänge im HBS [8] rechnerisch vorgeben. Diese ergeben sich aufgrund der geringen Ausnützung des linken Fahrstreifens bei zweistreifigen Einfahrten. Deshalb wurde vorgeschlagen, den Bemessungszusammenhang in Abhängigkeit des Anteils der Linksabbieger in der betreffenden Einfahrt wie folgt zu formulieren:

$$q_{n,\max} = 3600 \cdot \frac{n_e}{t_f} \cdot e^{-\frac{q_k}{3600} \left(t_g - \frac{t_f}{2} \right)}$$

$$n_e = \begin{cases} 1 & \text{für 1-streifige Zufahrten} \\ 0.3 \cdot a_{LA} + 1.06 & \text{für 2-streifige Zufahrten} \end{cases}$$

$q_{n,\max}$ = Grundkapazität der Zufahrt [PWE/h]
 q_k = Verkehrsstärke im Kreis [PWE/h]
 n_e = Anzahl der Fahrstreifen in der Zufahrt [-]
 t_g = Grenzzeitlücke [s]
 t_f = Folgezeitlücke [s]
 a_{LA} = Anteil der Linksabbieger an der Gesamtverkehrsstärke der betrachteten Zufahrt

mit $t_g = 4.1$ s, $t_f = 2.5$ s

Die folgende Abbildung zeigt die Bemessungszusammenhänge für verschiedene Linksabbiegeranteile bei zweistreifigen Kreiseln sowie für einstreifige Kreisel.

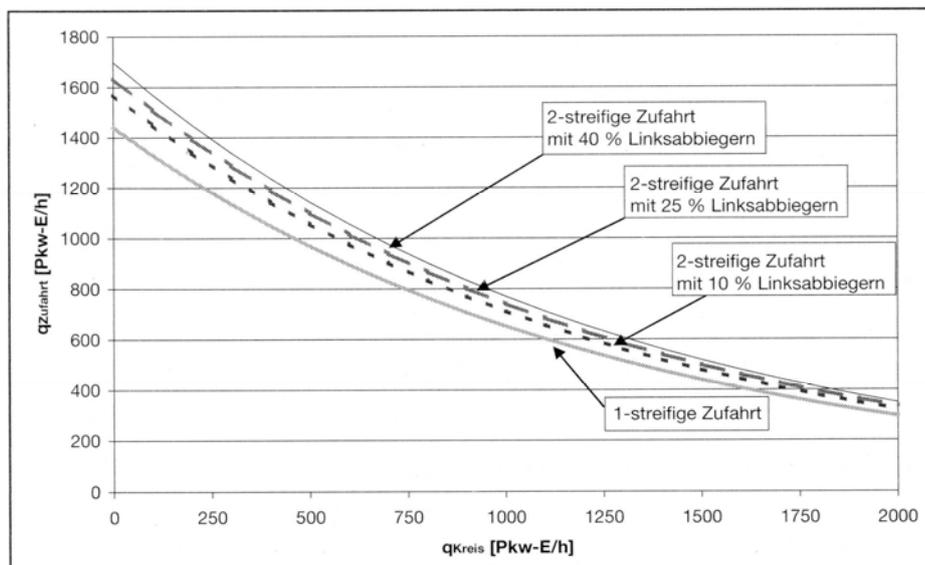


Abb. 1.5 Bemessungszusammenhang für zweistreifige Kreisel nach Brilon [7]

In [9] und [12] wird zur Vereinfachung vorgeschlagen für alle zweistreifigen Einfahrten n_e gleich 1.14 anzunehmen.

In der oben genannten Forschungsarbeit [7] wurde neben der Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel auch die Verkehrssicherheit bei diesem Knotentyp untersucht. Es zeigte sich, dass zweistreifig befahrbare Kreisel ein hohes Sicherheitsniveau aufweisen. Dies ist vor allem auf die geringe Unfallschwere zurückzuführen.

Kapazität von Kreisverkehren – Aktualisierung nach Brilon, Wu (2008) [10]

Zurzeit liegen in Deutschland die Vorschläge von Brilon und Wu [10] zur praktischen Anwendung bei der Bemessung von Kreiseln vor. Dabei werden die Übergänge zwischen einstreifigen Kreiseln verschiedener Grösse, die nach [8] und [9] bestehen, gleichmässig überbrückt. Sie halten sich an die Rahmen und sachlichen Vorgaben des HBS [8] und des Kreisverkehrsmerkbblatts [9]. Eine deutliche Modifikation ergibt sich dabei nur für grosse zweistreifige Kreisel mit Radien grösser als 60 m. Die differenzierten Bemessungsformeln sind in Tab. 1.1 zusammengestellt und in Abb. 1.6 dargestellt.

Tab. 1.1 Zusammenstellung der Formeln zur Kapazitätsberechnung [10]

Kreisverkehrstyp	Aussendurchmesser [m]	Kapazitäts-Formel
Minikreisverkehr	$13 \leq D \leq 26$	$Q_{E,max} = \left(1 - \frac{\Delta \cdot Q_K}{3600}\right) \cdot \frac{3600}{t_f} \cdot e^{-\frac{Q_K}{3600} \cdot (t_g - \frac{t_f}{2} - \Delta)}$ <p>mit $t_g = 3.86 + \frac{8.27}{D}$, $t_f = 2.84 + \frac{2.07}{D}$, $\Delta = 1.57 + \frac{18.6}{D}$</p>
Kleinkreisverkehr 1/1	$26 \leq D \leq 40$	
Kleinkreisv. 1/2 und Grosskreisv. 1/2	$40 \leq D \leq 60$	$Q_{E,max} = 1440 \cdot e^{-\frac{Q_K}{1180}}$
Kleinkreisverkehr 2/2	$40 \leq D \leq 60$	$Q_{E,max} = 1642 \cdot e^{-\frac{Q_K}{1180}}$
Grosskreisverkehr 2/2	$D > 60$	$Q_{E,max} = 1926 \cdot e^{-\frac{Q_K}{1405}}$

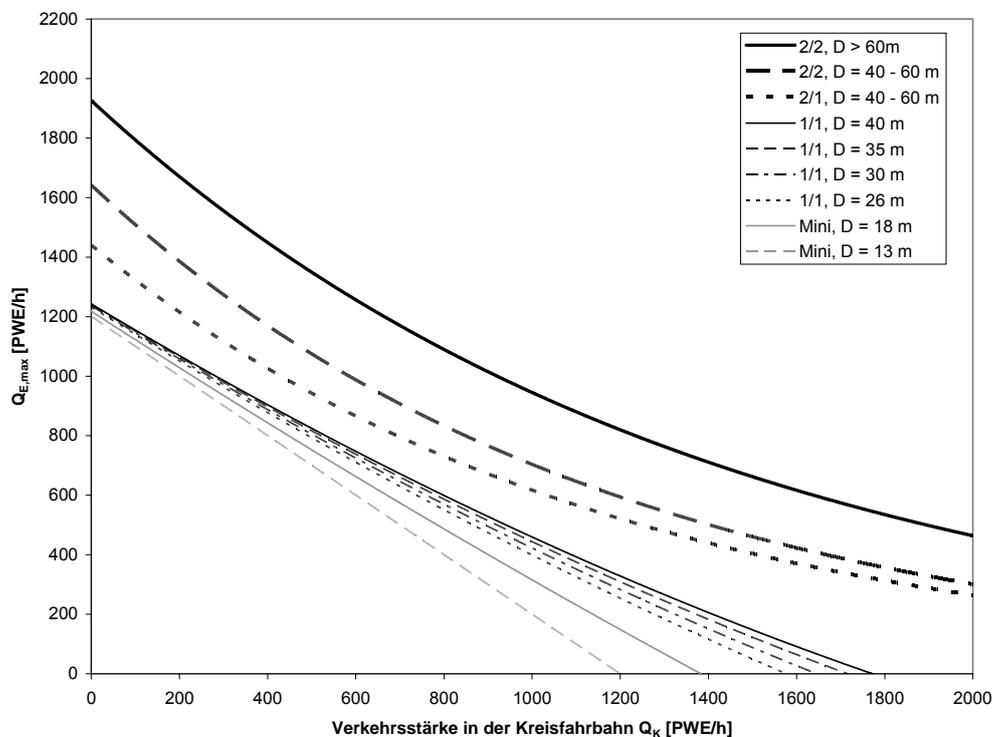


Abb. 1.6 Kapazität der Einfahrt als Funktion der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn nach Brilon [10]

1.2.3 Verkehrssicherheit Schweiz

Zur Verkehrssicherheit von Kreiseln wurden in der Schweiz seit Mitte der 90er-Jahre verschiedenen Untersuchungen durchgeführt. Nebst einigen durch kantonale Stellen (Tiefbauämter, Verkehrspolizei) vorgenommenen Abklärungen, stellen eine Untersuchung von der Beratungsstelle für Unfallverhütung bfu [13] und eine im Rahmen des Forschungsauftrages VSS 17/93 [14] für einstreifige Kreiseln durchgeführte Untersuchung wesentliche Erkenntnisse zur Verkehrssicherheit von Kreiseln dar. Weitere Erkenntnisse liefert eine kleine im Nachgang zum Forschungsauftrag „Leistungsfähigkeit hochbelasteter Kreiseln, Grundlagen“ (VSS 1998/076) erfolgte Zusammenstellung des Unfallgeschehens von einstreifigen (Typ 1/1) und einstreifigen, überbreiten (Typ 2/1+) Kreiseln des IVT [15].

In all diesen Untersuchungen wurde das Unfallgeschehen hauptsächlich mittels absoluter Zahlen vor allem im Zusammenhang mit geometrischen Grössen der Anlage oder mit dem Unfallort (Kollisionspunkte) im Kreisel bzw. in den Zufahrten analysiert. Auf Basis dieser Grundlagen liessen sich Empfehlungen für den Einsatz und die Gestaltung von Kreiseln ableiten und schliesslich normieren (SN 640 263 [16]). Aus diesen Untersuchungen mit absoluten Unfallzahlen und Unfallkenngrössen liessen sich auch erste Vergleiche zwischen den Betriebsformen Typ 1/1 und Typ 2/2, allerdings noch aufgrund weniger zweistreifiger Kreisel, anstellen. Immerhin führte vor allem die bfu-Untersuchung „Sicherheit von Kreiselanlagen“ [13] zur Feststellung, dass aufgrund der absoluten Unfallzahlen zweistreifige Kreisel ein deutlich schlechteres Sicherheitsniveau aufweisen als einstreifige. Dabei wurde die erbrachte Verkehrsleistung der Anlagen noch nicht quantitativ berücksichtigt und in die Beurteilung miteinbezogen. Die Berücksichtigung des verkehrsleistungsbezogenen Unfallgeschehens durch Berechnung der sogenannten Unfallziffer und damit schlüssige Vergleiche der verschiedenen Betriebsformen Typ 1/1, Typ 2/1+ und Typ 2/2 sowie Vergleiche mit dem Ausland (Deutschland) fehlte bisher.

Zusammengefasst lassen sich immerhin die folgenden Werte aus früheren Untersuchungen angeben:

Tab. 1.2 Unfallzahlen für Kreisel nach Bühlmann [14] bzw. Lindenmann [15]

Typ	ϕ U/Jahr	ϕ VU/Jahr	Unfallort			Anteil Unfalltyp			
			Einfahrt	Ausfahrt	Kreis-FB	Selbst-U	Auffahr-U	FS-Wechsel	Richt.-Wechsel
2/1+	3.82	0.84	43 %	21 %	36 %	15 %	18 %	32 %	31 %
1/1	2.48	0.68	77 %	12 %	11 %	22 %	10 %	-	57 %

Tab. 1.3 Unfallzahlen für Kreisel nach Lindenmann [15]

Typ	ϕ U/Jahr Einfahrt		ϕ U/Jahr Ausfahrt		ϕ U/Jahr Kreisfahrbahn	
	Einstreifig	Zweistreifig	Einstreifig	Zweistreifig	Einstreifig	Zweistreifig
2/1+	0.29	0.55	0.22	-	1.44	

Im Rahmen des VSS Forschungsauftrages „Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr“ [17] wurden auch relative Unfallkenngrössen für Knoten und dabei speziell auch für Kreisel erarbeitet. Demnach resultieren folgende Wert:

- 3-armige Kreisel: $U_z = 0.27 U/10^6$ Fz
- 4-armige Kreisel: $U_z = 0.53 U/10^6$ Fz
- 5-armige Kreisel: $U_z = 0.69 U/10^6$ Fz

Es erfolgte dabei keine Unterscheidung nach Betriebsformen, also für einstreifige bzw. zweistreifige Kreisel. Es handelt sich jedoch bei der überwiegenden Mehrheit um einstreifige Kreisel.

1.2.4 Verkehrssicherheit Deutschland

Im Rahmen der Untersuchung „Überprüfung von Kreisverkehren mit zweistreifig markierter oder einstreifig markierter, aber zweistreifig befahrbarer Kreisfahrbahn“ [7] erfolgte eine detaillierte Auswertung des Unfallgeschehens und die Berechnung der verkehrsleistungsbezogenen Unfallrate (entspricht der schweizerischen Unfallziffer). Aus dieser Untersuchung konnte zumindest eine durchschnittliche Unfallziffer für sechs zweistreifig markierte Kreisel herausgefiltert werden:

$$2/2: U_z = 0.63 U/10^6 \text{ Fz}$$

Die Unfallziffer für zweistreifige Kreisel in Deutschland kann für Vergleichszwecke zu entsprechenden schweizerischen Grössen herangezogen werden.

1.3 Ziele

1.3.1 Forschungsziele

Ziel dieser Forschungsarbeit war die Erarbeitung von Grundlagen zur Ergänzung der Norm „Knoten mit Kreisverkehr“ [1]. Anhand empirischer Untersuchungen sollte für schweizerische Verhältnisse ein fundierter Bemessungszusammenhang für zweistreifige Kreiseln ausgearbeitet werden. Neben der Herleitung der Leistungsfähigkeit der Einfahrt in Abhängigkeit der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn, sollte auch der Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit der Ein- und Ausfahrten untersucht werden.

Die Erhebung der Zeitlücken, welche das Verhalten der Fahrzeuglenker beim Einfahren in den Kreiseln charakterisieren und die fahrstreifenweise Auswertung der Grenz- und Folgezeitlücken war zur Bestimmung der Gesamtleistungsfähigkeit erforderlich und sollte Hinweise für eine allfällige Fahrstreifensignalisation bei zweistreifigen Kreiseln liefern. Insbesondere sollten Kriterien bzw. Richtwerte bzgl. der Verteilung der Verkehrsmengen auf beide Fahrstreifen in den Zufahrten erarbeitet werden, ab welcher eine Ziel- bzw. Fahrstreifenzuweisung mittels Signalisation und/oder Markierung als zweckmässig erscheint.

Mit Hilfe von absoluten und relativen Unfallkennzahlen war das Sicherheitsniveau für zweistreifigen Kreiseln zu bestimmen.

Abschliessend waren Vergleiche zwischen zweistreifigen und einstreifigen Kreiseln bezüglich der Leistungsfähigkeit und der Sicherheit anzustellen. Für diese Vergleiche waren nebst bekannten Resultaten aus früheren schweizerischen Untersuchungen auch Forschungsarbeiten aus dem Ausland heranzuziehen. Basierend auf diesen Vergleichen sollen abschliessend Hinweise zu Einsatzmöglichkeiten und -grenzen angegeben werden.

1.3.2 Umsetzung der Resultate für die Praxis

Die auf empirischen Erhebungen im Verkehrsablauf abgestützten Richtwerte zur Dimensionierung zweistreifiger Kreiseln bilden die Basis für die Ergänzung der bestehenden Norm „Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit – Knoten mit Kreisverkehr“ (SN 640 024a) [1]. Die bis anhin bestehenden Unklarheiten bei der verkehrstechnischen Dimensionierung zweistreifiger Kreiseln sollen mit dem vorliegenden Forschungsergebnissen beseitigt werden und dem Normanwender ist eine für schweizerische Verhältnisse gültige Bemessungsgrundlage zur Verfügung zu stellen.

Die Unfallauswertungen geben Aufschluss über das Sicherheitsniveau von zweistreifigen Kreiseln und stellen Grundlagen für Empfehlungen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit dar. Allfällige Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses der Geometrie von zweistreifigen Kreiseln sollten bei der Überarbeitung der Norm „Knoten – Knoten mit Kreisverkehr“ (SN 640 263) [16] berücksichtigt werden. Die Ergebnisse zum Sicherheitsniveau werden in der in Bearbeitung stehenden Norm „Sicherheitsniveau von Strassenverkehrsanlagen“ Verwendung finden.

1.4 Begriffe und Abkürzungen

Die folgenden Tabellen enthalten eine Übersicht der Begriffe und Abkürzungen zur Beschreibung der Anlage, Geometrie und Leistungsfähigkeit eines Kreisels sowie zum Unfallgeschehen.

Tab. 1.4 Begriffe und Abkürzungen zu Anlage und Geometrie

Abkürzung	Begriff
1/1	Kreisel mit einstreifige Einfahrt und einstreifige Kreisfahrbahn
2/1+	Kreisel mit zweistreifige Einfahrt und einstreifige, überbreite Kreisfahrbahn
2/2	Kreisel mit zweistreifige Einfahrt und zweistreifige Kreisfahrbahn
D	Aussendurchmesser in m
FS	Fahrestreifen
FB	Fahrbahn

Tab. 1.5 Begriffe und Abkürzungen zur Verkehrsstärke

Abkürzung	Begriff
Q_K	Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn auf Höhe der Einfahrt in PWE/h
Q_E	Verkehrsstärke in der Einfahrt in PWE/h
L_E	Leistungsfähigkeit der Einfahrt in PWE/h
L_A	Leistungsfähigkeit der Ausfahrt in PWE/h
FG	Querende Fussgänger auf dem Fussgängerstreifen (Ein- / Ausfahrt) in FG/h

Tab. 1.6 Begriffe und Abkürzungen zum Verkehrsablauf

Abkürzung	Begriff	Definition
t_0	Null-Zeitlücke	$t_0 = t_g - t_f/2$ (nach [18])
Δt	Zeitlücke bzw. Bruttozeitlücke	Zeitlicher Abstand, der zwischen gleichartigen Bezugspunkten aufeinanderfolgenden Fahrzeuge an einem Querschnitt auf der Kreisfahrbahn gemessen wird [8]
t_g	Grenzzeitlücke (mittlere)	Kleinste Zeitlücke in einem vortrittsberechtigten Strom, die im Mittel von einem wartepflichtigen Fahrzeug zur Ausführung des beabsichtigten Fahrmanövers angenommen wird [8]
t_f	Folgezeitlücke (mittlere)	Die Folgezeitlücke t_f ist der Mittelwert der Zeiten, die zwischen den Starts zweier aufeinanderfolgenden Fahrzeuge im vortrittsbehäfteten Strom liegt, die in dieselbe Zeitlücke des Hauptstroms einfahren [11]
n	Anzahl Fz	Anzahl Fahrzeuge in der Einfahrt, welche Δt zum Einfahren benötigen

Tab. 1.7 Begriffe und Abkürzungen zum Unfallgeschehen

Abkürzung	Begriff	Definition
U	Anzahl Unfälle	
VU	Anzahl Verunfallte	Summe der Verletzten und Getöteten
US	Unfallschwere	$US = VU / U$
U_z	Unfallziffer	Anzahl Unfälle bezogen auf die Fahrleistung, für Kreisel [19]:
$U_z = \frac{U \cdot 10^6}{\frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n DTV_i \cdot 365 \cdot T}$		
	i	= Anzahl Kreselarme
	DTV_i	= DTV im Querschnitt des Kreselarms i in Fz/Tag
	$\frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n DTV_i$	= Summe der in den Kresel einfahrenden Fz in Fz/Tag
	T	= Beobachtungszeitraum in Jahren

2 Vorgehen und Methodik

2.1 Grundsatz

Grundlage für die Forschungsarbeit bildeten 15 ausgewählte zweistreifige Kreisel in der Schweiz. Bei jedem Kreisel wurde an den stark belasteten Einfahrten eine Videoerhebung des Verkehrsablaufs durchgeführt. Diese Erhebungen wurden hinsichtlich der Leistungsfähigkeit in den Ein- und Ausfahrten ausgewertet und analysiert. Neben den Untersuchungen zum Verkehrsablauf wurde eine Auswertung des Unfallgeschehens bei den ausgewählten Kreiseln durchgeführt.

Die Ergebnisse der beiden Untersuchungsteile wurden anschliessend beurteilt und den Ergebnissen ausländischer Untersuchungen gegenübergestellt. Basierend auf diesen Bewertungen und Vergleichen wurden Folgerungen abgeleitet, welche in die bestehenden Normen eingearbeitet werden sollen.

Das Vorgehen bei der Forschungsarbeit ist in Abb. 2.7 schematisch dargestellt.

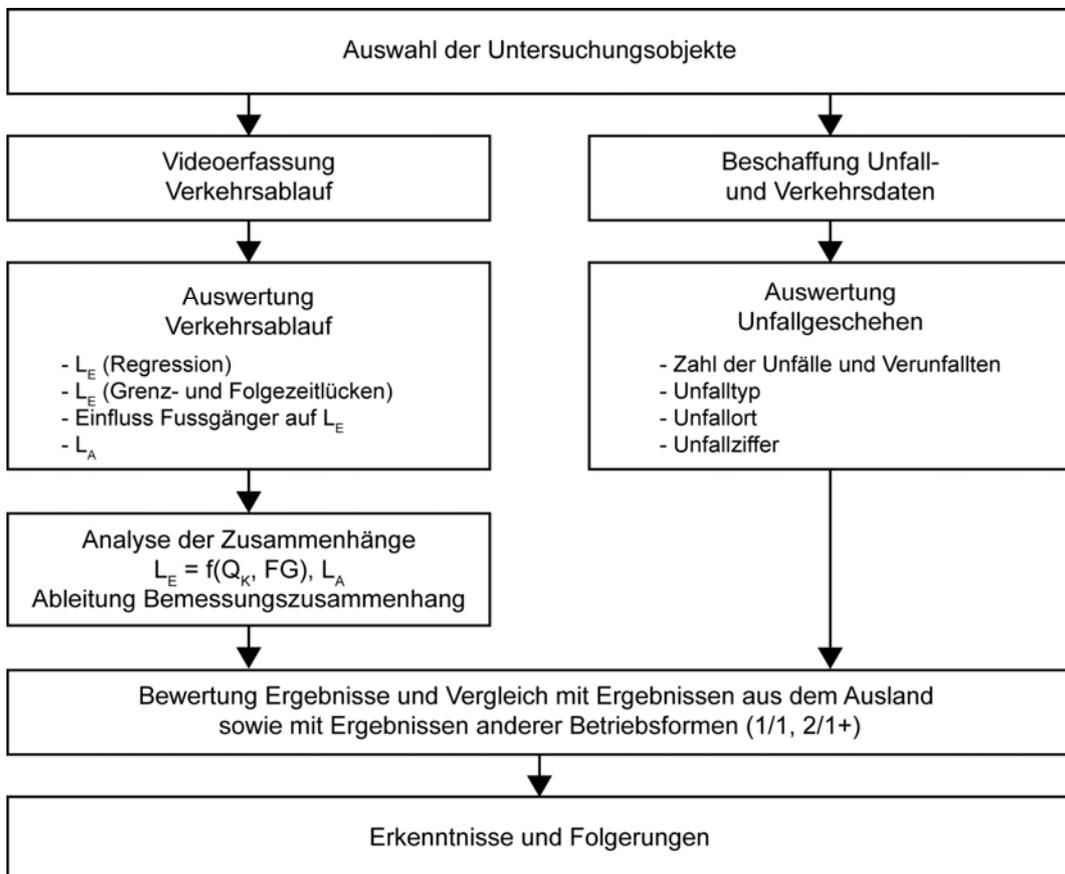


Abb. 2.7 Vorgehen Forschungsarbeit VSS 2005/301

2.2 Auswahl der Untersuchungsobjekte

Mit Hilfe einer Umfrage bei den zuständigen Stellen der Kantone wurde eine Bestandaufnahme der vorhandenen zweistreifigen Kreisel durchgeführt. Eine Analyse der Einflussparameter lieferte die Merkmale, welche die zu untersuchenden Kreisel aufweisen sollten, um die leistungstechnischen und geometrischen Zusammenhänge und Einflüsse im Verkehrsablauf erfassen zu können.

Das wichtigste Kriterium für die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Kreiseleinfahrten bildete die Anforderung, dass mindestens eine Einfahrt des Kreisels ausgelastet (gesättigt) sein muss, um jenen Zustand hoher Belastungen im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit erfassen zu können. Diese Zustände bilden die Grundlage für die Formulierung des gesuchten Bemessungszusammenhangs für zweistreifige Kreisel. Daneben sollten die Untersuchungsobjekte eine möglichst grosse Bandbreite hinsichtlich des Aussendurchmessers abdecken und Fahrstreifensignalisationen bzw. -markierungen aufweisen. Darüber hinaus wurden weitere Merkmale der Anlage und des Betriebs der Kreisel unterschieden um mögliche Zusammenhänge und Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit erkennen zu können. Folgende Merkmale wurden bei allen Untersuchungsobjekten erfasst:

- Durchmesser
- Anzahl Knotenarme
- Geometrische Form
- Anzahl Fahrstreifen in den Einfahrten
- Fahrstreifenbreiten in den Einfahrten
- Breite Kreisfahrbahn
- Anzahl Fahrstreifen in den Ausfahrten
- Fahrstreifenbreiten in den Ausfahrten
- Bodenmarkierungen in der Einfahrt
- Fahrstreifensignalisation
- Signalisierte Geschwindigkeit in den Zufahrten
- Fussgängerstreifen

Basierend auf diesen Festlegungen wurde die Auswahl der Untersuchungsobjekte getroffen. Die Tab. 2.8 enthält eine Übersicht der 15 ausgewählten Kreisel mit Angaben zur Anlage und zur Geometrie. Im Anhang II befindet sich eine detaillierte Zusammenstellung der Daten der einzelnen Untersuchungsobjekte.

Tab. 2.8 Übersicht Untersuchungsobjekte

Nr.	Ort (Kanton)	Kreisel	Durchmesser [m]	Anzahl Arme	Anzahl Einfahrten mit 2 FS	Anzahl Ausfahrten mit 2 FS
1	Pratteln (BL)	Frenkendörferstr.	50	4	1	1
2	Avry-sur-Matran (FR)	Avry-sur-Matran	35	4	3	0
3	Avry-sur-Matran (FR)	Avry-Centre	40	4	4	0
4	Matran (FR)	Bois des Morts	34	4	3	1
5	Murten (FR)	Löwenberg	40	4	3	0
6	Granges-Paccot (FR)	Lavapesson	36	3	2	0
7	Granges-Paccot (FR)	Chenevière	42	4	2	0
8	Kriens (LU)	Schlund	60	5	5	0
9	Sursee (LU)	Glockenstrasse	38	4	3	2
10	Sursee (LU)	Schlottermilch	34	4	4	0
11	Au (SG)	Adlerkreuzung	34	4	4	0
12	Schindellegi (SZ)	Soleil-Kreisel	50	4	1	0
13	Lugano (TI)	Povro	40	4	1	2
14	Vevey (VD)	Genevrier	40	5	3	3
15	Neuheim (ZG)	Sihlbrugg	42	5	2	0

Im Vergleich zu den in [2] untersuchten Kreiseln des Typs 2/1+ weisen die Objekte in Tab. 2.8 grössere Aussendurchmesser auf. Für die untersuchte Betriebsform 2/2 besteht zurzeit keine Projektierungsnorm.

Bei der Co-Forschungsstelle Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum (RUB) wurde parallel eine Forschungsarbeit mit dem Titel „Verkehrsqualität an zweistreifigen Kreisverkehren unter Berücksichtigung der Abbiegebeziehungen und aktueller Grenz- und Folgezeitlücken“ [20] durchgeführt. Bei den Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der Einfahrten konnten bei Bedarf zur Verbesserung der Stichprobe die Daten aus Deutschland miteinbezogen werden.

2.3 Erhebungs- und Auswertungsmethodik Verkehrsablauf

2.3.1 Videoerfassung des Verkehrsablaufs

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden 15 Kreiseln mit zweistreifiger Kreisfahrbahn und zweistreifigen Einfahrten beobachtet. Wichtige Kriterien zur Auswahl dieser Kreiseln waren hohes Verkehrsaufkommen und gute Einsehbarkeit der Kreisfahrbahn und Einfahrten. Bei allen Kreiseln wurde der Verkehrsablauf während der Abendspitze über einen Zeitraum von 90 Minuten auf Video aufgezeichnet.

Alle Videos wurden mit der Sony Handycam DCR-HC 16 E PAL mit Weitwinkelobjektiv VCL-0625S und Timecode-Funktion auf MiniDV Kassetten im Modus Longplay aufgenommen.

2.3.2 Auswertung der Videaufzeichnungen der Einfahrten

Bezugslinien

Als Grundlage zur Ermittlung von Grenzzeitlücken, Folgezeitlücken und Verkehrsmengen bei gesättigter Einfahrt wurde eine extensive Videoauswertung durchgeführt. Diese bestand aus der mehrfachen Betrachtung der Videoaufzeichnungen mit Hilfe eines Programms, welches die Eingabe von definierten Ereignissen mit zugehörigen Zeitstempeln erlaubt. Die zu erfassenden Ereignisse sind an Bezugslinien (Abb. 2.8) geknüpft, welche für jede zu betrachtende Einfahrt wie folgt definiert wurden:

- Referenzlinie Einfahrt: Haltelinie der Einfahrt
- Referenzlinie Kreisfahrbahn: Linie quer über die Kreisfahrbahn von der zugewandten Ecke der Treninsel bis zum Mittelpunkt des Kreisels



Abb. 2.8 Bezugslinie für Videoauswertung [20]

Fahrzeuge auf der zweistreifigen Einfahrt wurden getrennt nach „Einfahrt rechts“ und „Einfahrt links“ beobachtet und dabei laufend folgende Ereignisse per Tastendruck erfasst:

- Ankunft des Fahrzeugs an der Referenzlinie Einfahrt mit gleichzeitiger Klassifizierung des Fahrzeugtyps
- Abfahrt des Fahrzeugs von der Referenzlinie Einfahrt

Fahrzeuge auf der zweistreifigen Kreisfahrbahn wurden ohne Klassifizierung des Fahrzeugtyps zum Zeitpunkt der Überquerung der Referenzlinie Kreisfahrbahn per Tastendruck erfasst.

Sättigungszustand

Zur Bestimmung der Verkehrsmengen bei gesättigter Einfahrt musste ein geeignetes Sättigungskriterium definiert werden, welches exakt beobachtbar ist. Jede Sättigungsphase wird durch ein Anfangs- und ein Abbruchkriterium begrenzt:

- **Anfangskriterium:** Es warten mindestens zwei Fahrzeuge hintereinander, entweder auf dem rechten oder dem linken Fahrstreifen der Kreiseinfahrt an der Referenzlinie Einfahrt. Sobald die Vorderachse des ersten Fahrzeugs diese Referenzlinie überquert, wird dies per Tastendruck erfasst.
- **Abbruchkriterium:** Sobald der Fahrzeugstrom auf der betrachteten Kreiseinfahrt abreißt, wird dies per Tastendruck erfasst. Dieses Kriterium ist dann gegeben, wenn die Zeitlücke eines nachrückenden Fahrzeugs – egal auf welchem Fahrstreifen der Einfahrt – grösser als vier Sekunden wird.

Für die Hochrechnung der Verkehrsmengen von Einfahrt und Kreisfahrbahn werden nur Intervalle dieser Sättigungsphasen berücksichtigt.

Diese Kriterien wurden sinngemäss auch für die Bestimmung der Leistungsfähigkeit in den Ausfahrten angewandt.

Untersuchungsobjekte für die Auswertung der Einfahrten

Der Kreisel Nr. 12 konnte aufgrund der zu geringen Verkehrsmengen für die Untersuchung der Leistungsfähigkeiten der Einfahrten nicht verwendet werden. Die Tab. 2.9 liefert eine Übersicht über die untersuchten Kreiseinfahrten.

Tab. 2.9 Übersicht untersuchte Kreiseleinfahrten

Nr.	Ort	Kreisel	Kreiselarm	D [m]	FS-Breite [m]		FS-Mark. und/oder -Signale
					Kreis-FB	Einfahrt	
1	Pratteln	Frenkend.str.	Frenkend.str. Rtg. Liestal	50	11.5	2 x 3.5	Ja
2	Avry-sur-Matran	Avry-sur-Matran	Route de Fribourg	35	8.0	2 x 3.75	Ja
3	Avry-sur-Matran	Avry-Centre	Route de Matran	40	11.0	2 x 3.5	Nein
4	Matran	Bois des Morts	R. de Neyruz (Arm 3) (4.1)	34	9.0	2 x 3.75	Ja
			R. de la Pâla (4.2)			2 x 3.75	Ja
5	Murten	Löwenberg	Rtg. A1	40	9.0	2 x 3.0	Ja
6	Granges-Paccot	Lavapesson	R. de Morat Rtg. A12 (6.1)	36	9.0	2 x 3.5	Ja
			R. de Morat Rtg. Frib. (6.2)			2 x 3.0	Ja
7	Granges-Paccot	Chenevière	Rtg. Cormagens	42	12.0	k.A.	Ja
8	Kriens	Schlund	Anschluss A2 Rtg. Nord	60	10.7	4.0 / 4.5	Ja
9	Sursee	Glockenstrasse	Surentalstr. Rtg. Zentr. (9.1)	38	8.6	2 x 3.5	Ja
			Surentalstr. Rtg. AB (9.2)			2 x 3.5	Ja
10	Sursee	Schlottermilch	Schlottermilch	34	9.0	2 x 3.0	Nein
11	Au	Adlerkreuzung	Zollstrasse	34	9.5	6.5	Ja
13	Lugano	Povro	Via Bioggio Rtg. Lugano	40	9.5	2 x 4.0	Nein
14	Vevey	Genevrier	Route du Rio Grédon	40	10.0	10.0	Nein
15	Neuheim	Sihlbrugg	Sihltalstrasse	42	11.0	3.5/4.75	Nein

2.3.3 Leistungsfähigkeit Einfahrten, Regressionsanalyse Verkehrsmengen

Für die Bestimmung des Bemessungszusammenhangs $L_E = f(Q_K)$ gelangte unter anderem wie bereits bei früheren Untersuchungen [2] das Regressionsverfahren zur Anwendung. Dabei werden in kurzen Intervallen (z.B. 30 s oder 60 s) die Anzahl einfahrender Fahrzeuge und die Anzahl auf der Kreisbahn fahrender Fahrzeuge am Querschnitt der Einfahrt gezählt und auf eine Stunde hochgerechnet. Bei der Auswertung wurden nur Intervalle berücksichtigt, welche einen gesättigten Verkehrszustand aufweisen (vgl. 2.3.2).

Für jede Kreiseleinfahrt wurde für die Gesamtheit der Intervalle mittels Regressionsverfahren der Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt (Q_E) und der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn (Q_K) ermittelt. Anschliessend wurde das Regressionsverfahren für alle gesättigten Intervalle bei allen Untersuchungsobjekten angewandt und so der Bemessungszusammenhang $L_E = f(Q_K)$ für die Stichprobe der zweistreifigen Kreisel bestimmt.

Um mögliche Einflüsse der Geometrie, der Signalisation und der Verteilung des Verkehrs auf den zwei Fahrstreifen in der Einfahrt auf die Gesamtleistungsfähigkeit erkennen zu können, wurden verschiedene Kreisel-Gruppen gebildet und jeweils die Regressionen berechnet.

2.3.4 Leistungsfähigkeit Einfahrten, Analyse Zeitlücken

Die zweite Methode zur Herleitung des Bemessungszusammenhangs $L_E = f(Q_K)$ basiert auf dem Verfahren nach Siegloch [18] bzw. Wu [21] mit Grenz- und Folgezeitlücken, die nach der Maximum-Likelihood-Methode bestimmt werden. Mit Hilfe der Videoauswertung wird registriert, ob die vorhandenen Zeitlücken auf der Kreisfahrbahn das Einfahren einem oder mehreren Fahrzeugen aus der Einfahrt erlauben (angenommene Zeitlücken) oder nicht (abgelehnte Zeitlücken). Gleichzeitig werden die Folgezeitlücken der Fahrzeuge, die bei einer angenommenen Zeitlücke auf der Kreisfahrbahn dem ersten Fahrzeug folgen, gemessen. Damit lassen sich für alle einfahrenden Fahrzeuge die individuellen, angenommenen Zeitlücken durch Differenzbildung der angenommenen Zeitlücke abzüglich der Folgezeitlücke bestimmen.

Die erwähnten Grössen bilden die Basis für die Auswertung der Grenzzeitlücken nach dem, gemäss verschiedener Untersuchungen als geeignete Methode bezeichneten, Maximum-Likelihood-Verfahren nach Troutbeck [22]. Als mathematische Funktion für die statistische Verteilung der Zeitlücken wird eine logarithmische Normalverteilung verwendet, da diese nach dem heutigen Stand des Wissens als zweckmässigste Beschreibung der tatsächlichen Verhältnisse bzgl. der Grenzzeitlückenverteilung gilt.

Die Parameterschätzung erfolgt durch numerische Maximierung der Likelihood-Funktion:

$$L = \sum_{i=1}^n \ln[F(a_i) - F(r_i)]$$

a_i = vom i-ten Fahrer angenommene Zeitlücke

r_i = vom i-ten Fahrer grösste abgelehnte Zeitlücke (= 0, bei keiner abgelehnten Zeitlücke)

$F(\cdot)$ = Verteilungsfunktion der Normalverteilung;

$$F(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right]$$

$$\text{mit } \mu = e^{\mu + \sigma^2/2} \quad \text{und} \quad \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

μ = Erwartungswert mittlere Grenzzeitlücke t_g

σ = Varianz der Grenzzeitlücke t_g

$\operatorname{erf}(x)$ = Gausssche Fehlerfunktion

In der Verteilungsfunktion F sind die Parameter μ und σ enthalten. Das Maximum der Log-Likelihood-Funktion L wird mathematisch bestimmt durch die beiden Gleichungen:

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial L}{\partial \sigma} = 0$$

Durch iteratives Lösen des Gleichungssystems können die Parameter μ und σ bestimmt werden und damit die Verteilungsfunktion F der Grenzzeitlücke.

Die Folgezeitlücke wurde für jede Kreiseinfahrt als arithmetisches Mittel der beobachteten Zeitlücken, welche für eine Folgeeinfahrt genutzt wurden und kleiner als 5 Sekunden waren, gebildet.

Der Zusammenhang zwischen der Verkehrsmenge in der Einfahrt und auf der Kreisfahrbahn wurde anschliessend mit den Formeln nach Siegloch [18], Wu [21] sowie nach Brilon, Bäumer [7] berechnet.

Siegloch:

$Q_E = \frac{3600}{t_f} \cdot e^{-\frac{Q_K}{3600} \cdot (t_g - \frac{t_f}{2})}$	Q_E = Leistungsfähigkeit der Einfahrt [PWE/h]
	Q_K = Verkehrsmenge auf der Kreisfahrbahn [PWE/h]
	t_f = Folgezeitlücke [s]
	t_g = Grenzzeitlücke [s]

Die Siegloch-Formel ist die ursprüngliche Formel für die Anwendung der Zeitlückentheorie für die Berechnung von Leistungsfähigkeit bei vortrittsregulierten Knoten. Für die Berechnung der Kapazität der Einfahrten zu Kreiseln wird jedoch seit der Einführung des HBS 2001 [8] in Deutschland die allgemeinere Formel von Wu [21] zur Anwendung empfohlen.

Wu:

$Q_{E,max} = \left(1 - \frac{\Delta \cdot Q_K}{n_K \cdot 3600}\right)^{n_K} \cdot \frac{3600}{t_f} \cdot n_E \cdot e^{-\frac{Q_K}{3600} \cdot (t_g - \frac{t_f}{2} - \Delta)}$	$Q_{E,max}$ = maximal mögliche Verkehrsstärke der Einfahrt [PWE/h]
	Q_K = Verkehrsstärke im Kreis [PWE/h]
	t_f = Folgezeitlücke [s]
	t_g = Grenzzeitlücke [s]
	Δ = Mindestzeitlücke zwischen den Fahrzeugen jedes Fahrstreifens im Kreis [s]
	n_E = Anzahl der Fahrstreifen in der Zufahrt
	n_K = Anzahl der Fahrstreifen im Kreis

Wie unter 1.2.2 beschrieben, zeigten sich in der Forschungsarbeit „Überprüfung von Kreisverkehren mit zweistreifig markierter oder einstreifig markierter, aber zweistreifig befahrbarer Kreisfahrbahn“ [7] bei der Messung deutlich tiefere Leistungsfähigkeiten als bei der Berechnung nach den Bemessungszusammenhängen im HBS [8] aufgrund der geringen Ausnützung des linken Fahrstreifens bei zweistreifigen Einfahrten. Dieser Einfluss wurde in der angepassten Formel mit dem Anteil des linksabbiegenden Verkehrs am Gesamtverkehr in der Zufahrt berücksichtigt. Aufgrund der beschränkten statistischen Zuverlässigkeit schlagen Brilon und Bäumer [12] vor, einen einheitlichen Faktor für die Berücksichtigung des zweiten Fahrstreifens in der Einfahrt von 1.14 zu verwenden.

Brilon:

$G = 3600 \cdot \frac{n_e}{t_f} \cdot e^{-\frac{q_k}{3600} \cdot \left(t_g - \frac{t_f}{2}\right)}$	$Q_{n,max}$ = Grundkapazität der Zufahrt [PWE/h]
	q_k = Verkehrsstärke im Kreis [PWE/h]
	n_e = Anzahl der Fahrstreifen in der Zufahrt [-]
	t_g = Grenzzeitlücke [s]
	t_f = Folgezeitlücke [s]
$n_e = 1.14$ für 2 – streifige Zufahrten	
	mit $t_g = 4.1$ s, $t_f = 2.5$ s

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurden die Leistungsfähigkeiten der Kreiseinfahrten mit den ermittelten Grenz- und Folgezeitlücken mit allen drei Formeln oben bestimmt um die Unterschiede und Einflüsse erkennen zu können (vgl. 3.2). Auf die Möglichkeit den Faktor n_e analog zum Vorgehen von Brilon und Bäumer [12] neu zu kalibrieren wurde im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

2.3.5 Einfluss Fussgänger

Die Mehrheit der untersuchten Einfahrten ist mit Fussgängerstreifen ausgestattet. Zur Bestimmung des Einflusses von querenden Fussgängern auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrt sollten die Intervalle mit gesättigtem Verkehrszustand und gleichzeitig querenden Fussgängern ausgewertet werden.

Im Verlauf der Evaluation der Untersuchungsobjekte wurde festgestellt, dass bei den

zweistreifigen Kreiseln, welche selten in städtischen Bereichen liegen, generell nur geringe Fussgängermengen auftreten. Aus diesem Grund liessen sich schliesslich keine Auswertungen zum Einfluss der Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit zweistreifiger Einfahrten durchführen.

2.3.6 Kapazität Ausfahrten

Zur Kapazität der Ausfahrten an Kreiseln sind bisher keine qualifizierten Untersuchungen aus der Schweiz oder aus dem Ausland bekannt. Das rasche und vollständige Abfliessen des Verkehrs aus zweistreifigen Kreiseln, insbesondere bei einstreifiger Ausbildung der Ausfahrten, erscheint auf den ersten Blick hinsichtlich Kapazität unproblematisch. Es kann aber vermutet werden, dass bei hohen Ausfahrtsverkehrsmengen der Abfluss, insbesondere bei einer einstreifigen Ausfahrt und bei starkem querendem Fussgängerverkehr zu Rückstauerscheinungen in die Kreisfahrbahn führen kann.

Zur Klärung der Frage der Kapazität der Kreiselausfahrten, wurden aus den Videoaufnahmen die ausfahrenden Verkehrsmengen ausgewertet. Es interessierten die Zustände mit hoher Zahl an ausfahrenden Fahrzeugen. Analog zum Vorgehen bei der Leistungsfähigkeit bei Einfahrten wurde eine Sättigungsverkehrsmenge definiert und anschliessend nur gesättigte Intervalle in die Auswertung miteinbezogen. Ausgewertet wurden wiederum 30 Sekunden Intervalle. Das Sättigungskriterium wurde analog zur Auswertung der Einfahrten wie folgt festgelegt:

- Der Fahrzeugstrom reisst während der Intervalllänge nicht ab, d.h. innerhalb des Intervalls treten keine Zeitlücken zwischen zwei aufeinander folgenden Fahrzeugen grösser als vier Sekunden auf.

Für die Bestimmung von Richtwerten der Kapazität für ein- bzw. zweistreifige Ausfahrten, wurde für jede Kreiselausfahrt ausgehend von den gesättigten Intervallen der Mittelwert der Verkehrsmengen (Hochrechnung auf eine Stunde) ermittelt. Somit wird vermieden, dass man einzelne Intervalle mit sehr hohen Verkehrsmengen berücksichtigt, welche nur in ganz seltenen Fällen erreicht werden.

Bei der Auswertung der Kapazität der Ausfahrten stellt sich die Frage, wie nahe die maximal ausfahrende Verkehrsmenge bei ein- bzw. zweistreifigen Ausfahrten bei der Sättigungsverkehrsmenge der Fahrstreifen liegt.

Wie bei den Untersuchungen zu den Einfahrten, waren die Fussgängermengen auch bei den Ausfahrten zu gering, um eine Auswertung zum Einfluss der Fussgängermengen durchzuführen.

Die Tab. 2.10 zeigt eine Übersicht der untersuchten Kreiselausfahrten mit den Angaben zur Anzahl der Fahrstreifen und der Fahrstreifenbreiten.

Tab. 2.10 Übersicht untersuchte Kreiselausfahrten

Nr.	Ort	Kreisel	Ausfahrt	D [m]	Anz. FS in der Ausfahrt	FS-Breite Ausfahrt [m]	FG-Streifen
3	Avry-sur-Matran	Avry-Centre	Route de Matran (Arm 3)	40	1	5.5	Nein
4	Matran	Bois des Morts	Route de Neyruz (Arm 3)	34	2	2 x 4.0	Nein
6	Granges-Paccot	Lavapesson	Route de Morat Rtg. A12	36	1	5.55	Nein
			Route de Morat Rtg. Frib.		1	5.5	Nein
9	Sursee	Glockenstrasse	Surentalstrasse Rtg. AB	38	2	2 x 3.5	Ja
			Surentalstrasse Rtg. Zentr.		2	2 x 3.5	Ja
10	Sursee	Schlottermilch	Surentalstrasse	36	1	4.5	Ja

2.4 Erfassung und Auswertung Unfallgeschehen

2.4.1 Unfall- und Verkehrsdaten

Zur Analyse des Unfallgeschehens an zweistreifigen Kreiseln wurden die Unfallstatistikbögen der polizeilich registrierten Strassenverkehrsunfälle ausgewertet. Für die Untersuchung standen die Angaben für alle Untersuchungsobjekte mit einer Ausnahme für einen Zeitraum von mindestens drei Jahren, in der Regel von fünf Jahren zur Verfügung.

Somit konnten die Angaben zum Unfallgeschehen an 14 zweistreifigen Kreiseln ausgewertet werden. In die Unfallanalyse liessen sich 254 registrierte Unfälle miteinbeziehen. Dabei unterschieden sich die Angaben zu den Unfällen bezüglich der Detaillierungstiefe stark. Von einigen Kreiseln standen die Unfallprotokolle inklusive der Unfallskizzen zur Verfügung, bei anderen Kreiseln konnte nur eine Unfallübersicht mit Angaben zum Unfalltyp oder Unfalltypengruppe, zum Teil mit einer Karte mit den einzelnen Unfallorten für die Auswertung eingesetzt werden. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die Erfassungsdistanz in den Kreisellarmen je nach Kanton nicht einheitlich angewendet wird. Eine exakte Abgrenzung des zum Kreiselbereich gehörenden Unfallgeschehens war deshalb nicht möglich.

Neben den Informationen zu den Unfällen stellten die Kantone auch Angaben zu den Verkehrsmengen an den einzelnen Untersuchungsobjekten zur Verfügung. Auch hier unterscheiden sich die Angaben bezüglich der Aussagekraft. Von einigen Kreiseln waren genaue Angaben zum DTV und den Anteilen der Abbiegebeziehungen vorhanden, bei anderen existierten Zählungen in der Spitzenstunde und von einigen gab es nur Angaben zu Verkehrsmengen auf den Hauptachsen. Für die Untersuchung wurde wo nötig eine Umrechnung von der Spitzenstunde zum DTV vorgenommen oder eine Annahme für untergeordnete Verkehrsströme getroffen, so dass für alle Untersuchungsobjekte eine Angabe für die Anzahl der durchschnittlich pro Tag in den Kreisel einfahrenden Fahrzeuge zur Verfügung stand.

2.4.2 Unfallkenngrössen

Für die Fallauswertung wurden die absoluten Unfallkenngrössen, d.h. die Angaben zu Unfall- sowie Verunfalltenzahlen, der einzelnen Kreisel aufgelistet und in Beziehung zum Untersuchungszeitraum sowie zur Verkehrsleistung gestellt. Dabei wurden die Unfälle hinsichtlich der Unfalltypengruppe bzw. des Unfalltyps unterschieden. Zusätzlich wurden relative Unfallkenngrössen wie Unfallziffer und Unfallschwere bestimmt. Aufgrund der Unterlagen war eine Unterscheidung zwischen Unfällen mit Leicht- bzw. Schwerverletzten nicht möglich.

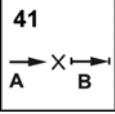
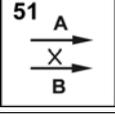
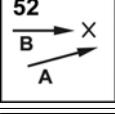
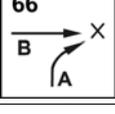
Besondere Beachtung wurde neben der Unfallhäufigkeit und Unfallschwere den Unfallorten beigemessen. Dazu waren die Kollisionspunkte der Unfälle in den zweistreifigen Zufahrten und Ausfahrten sowie auf der zweistreifigen Kreiselfahrbahn im Detail betrachtet worden.

Damit konnten jene Unfälle separiert werden, die typischerweise und einzig bei zweistreifigen Kreiseln auftreten. Dies ermöglichte eine Gegenüberstellung zu Unfallhäufigkeiten bei Kreiseln der Betriebsformen 1/1 und 2/1+. Zusätzlich wurden die Unfallkenngrössen mit Resultaten aus ausländischen Untersuchungen verglichen.

2.4.3 Unfalltypen und Örtlichkeit

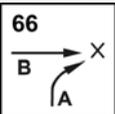
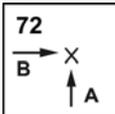
Unfälle wurden hinsichtlich der Konfliktsituationen in Unfalltypengruppen und Unfalltypen gemäss SN 640 010 [23] (siehe Anhang I) gegliedert. Die Tab. 2.11 enthält die für einen Kreisel charakteristischen Unfalltypen.

Tab. 2.11 Charakteristische Unfalltypen bei Kreiseln

Unfalltyp	Beschreibung
	Unfalltyp 13: Kollision mit festem Hindernis ausserhalb der Fahrbahn Ähnlicher Unfalltyp: Unfalltyp 12: Kollision mit festem Hindernis auf der Fahrbahn
	Unfalltyp 41: Aufprall auf stehendes Fahrzeug
	Unfalltyp 51: Kollision zwischen in gleicher Richtung fahrender Fahrzeuge (beim Vorbeifahren)
	Unfalltyp 52: Kollision beim oder nach Fahrstreifenwechsel
	Unfalltyp 66: Unfall beim Richtungswechsel (mit Abbiegen), nach rechts mit querendem Fahrzeug

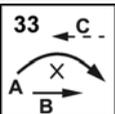
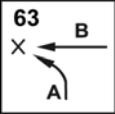
Es ist zu beachten, dass trotz der Verwendung der standardisierten Unfallprotokolle gewisse Unterschiede in deren Anwendung bestehen. Dies zeigt sich speziell bei der Zuordnung der Unfalltypen. Diese Problematik wird dadurch erhöht, dass sich die standardisierten Unfalltypen auf die Situation an gewöhnlichen Kreuzungen beziehen und nicht speziell für Kreisel ausgelegt sind. So werden Unfälle, bei denen der Einfahrende dem Fahrzeug auf der Kreisfahrbahn den Vortritt nicht gewährt entweder als Unfalltyp 66 oder aber 72 eingestuft (siehe Tab. 2.12). Für die Analyse des Unfallgeschehens wurden diese zwei Unfalltypen immer zusammengefasst.

Tab. 2.12 Problematik Zuordnung Kreiselunfälle zu Unfalltypen

Unfalltyp	Beschreibung	Unfalltyp	Beschreibung
	Unfalltyp 66: Unfall beim Richtungswechsel (mit Abbiegen), nach rechts mit querendem Fahrzeug		Unfalltyp 72: Unfall beim Queren (ohne Abbiegen), aus Sicht des Vortrittsberechtigten (B) Kollision von rechts

Bei Unfallstatistiken treten ausserdem zwei Unfalltypen auf, welche sich in einem Kreisel bei einem normalen Verkehrsablauf nicht ereignen (Tab. 2.13). Für diese Fälle wurden folgende Annahmen getroffen.

Tab. 2.13 Zuordnung der Unfalltypen zu den Örtlichkeiten eines Kreisels

Unfalltyp	Beschreibung	Annahme für Unfallauswertung Kreisel
	Kollision beim Vorbeifahren mit zu überholendem Fahrzeug (zu nahes Überholen)	Auf der Kreisfahrbahn ereignen sich keine Unfälle dieses Typs. Deshalb wird die Annahme getroffen, dass es sich um den Unfalltyp 51 handeln sollte.
	Unfall beim Richtungswechsel (mit Abbiegen), nach links mit querendem Fahrzeug	Im Kreisel nur möglich, wenn beide Fahrzeuge im Kreisel in falsche Richtung fahren. Deshalb wird die Annahme getroffen, dass es sich um Unfalltyp 66 handeln sollte.

Für die Auswertung des Unfallgeschehens wurde zusätzlich die Lage des Kollisionspunktes jedes Unfalls bestimmt. Dann erfolgte eine Zuordnung zu einer der vier folgenden Örtlichkeiten:

- Einfahrt
- Kreisfahrbahn, äusserer Fahrstreifen
- Kreisfahrbahn, innerer Fahrstreifen
- Ausfahrt

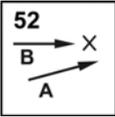
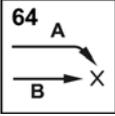
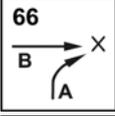
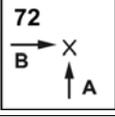
Die Zuordnung basiert auf den vorhandenen Informationen der einzelnen Unfälle. Damit konnte aufgrund der ungefähren Lage (aus Unfallskizze, anhand Koordinaten oder Übersichtskarte) und der Unfalltypengruppe bzw. des Unfalltyps auf die Lage des Kollisionspunkts geschlossen werden.

Beim Unfalltyp 52 (vgl. Tab. 2.14) ergaben sich Probleme bei der Zuordnung zum Unfallort. Es kann sich einerseits um einen Fahrstreifenwechsel auf der Kreisfahrbahn handeln, andererseits können es auch Unfälle sein, welche direkt mit dem Ausfahrmanöver aus dem Kreisel zusammenhängen. Die exakte Zuordnung liess sich teilweise aufgrund der zu ungenauen Angaben bezüglich der Unfallhergänge sowie der Unfallorte nicht vornehmen. Deshalb wurden alle diese Unfälle, ausser es handelte sich eindeutig um Fahrstreifenwechsel-Unfälle in einer zweistreifigen oder überbreiten Ausfahrt, der Örtlichkeit Kreisfahrbahn zugeordnet.

Bei den Unfällen des Typs 52 ist zudem zu beachten, dass es sich auch um Unfälle des Typs 64 (Unfall beim Richtungswechsel (mit Abbiegen), vgl. Anhang I) handeln könnte. Dann würden diese Unfälle der Ausfahrt zugeordnet. Aus diesem Grund wird der Anteil der Unfälle auf der Kreisfahrbahn bei der Unfallauswertung tendenziell eher etwas überschätzt.

Die folgende Tabelle liefert eine Übersicht über die getroffenen Annahmen bei der Zuordnung der Unfälle zu den verschiedenen Örtlichkeiten eines Kreisels.

Tab. 2.14 Zuordnung der Unfalltypen zu den Örtlichkeiten eines Kreisels

Unfalltyp	Beschreibung	Annahme für Unfallauswertung Kreisel
	Kollision beim oder nach dem Fahrstreifenwechsel	Unfälle dieses Unfalltyps werden der Örtlichkeit Kreisfahrbahn (ausser oder innen) zugeordnet.
	Unfall beim Richtungswechsel (mit Abbiegen), nach rechts in gleicher Fahrzeug	Ein solcher Unfall steht im Zusammenhang mit dem Ausfahrtsvorgang und wird deshalb zur Örtlichkeit Ausfahrt zugeordnet.
	Unfall beim Richtungswechsel (mit Abbiegen), nach rechts mit querendem Fahrzeug	Ein solcher Unfall steht im Zusammenhang mit dem Einfahrtsvorgang und wird deshalb der Örtlichkeit Einfahrt zugeordnet.
	Unfall beim Queren (ohne Abbiegen), aus Sicht des Vortrittsberechtigten (B) Kollision von rechts	Unfälle dieses Unfalltyps stehen im Zusammenhang mit dem Einfahrtsvorgang und werden deshalb der Örtlichkeit Einfahrt zugeordnet.

3 Ergebnisse

3.1 Leistungsfähigkeit der Einfahrten aus Regression

3.1.1 Vorbemerkungen

Bei der Videoauswertung wurden die Verkehrsmengen in der Einfahrt (Q_E) und auf der Kreisfahrbahn (Q_K) in kurzen Intervallen bestimmt. Als Intervalllänge wurden 30 und 60 Sekunden getestet und schliesslich aufgrund der grösseren Stichprobe sowie in Analogie zu früheren Untersuchungen [2] auf 30 Sekunden festgelegt. Für die Auswertung der Leistungsfähigkeit wurden nur die Wertepaare (Q_E / Q_K) der gesättigten Intervalle (vgl. Definition unter 2.3.2) verwendet.

Zur Ableitung des Zusammenhangs zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt (Q_E) und jener auf der Kreisfahrbahn (Q_K) werden die erfassten Wertepaare der Intervalle auf eine Stunde hochgerechnet und eine Umrechnung von Fz/h in PWE/h vorgenommen. Da die Längsneigungen der Einfahrten bei allen Kreiseln gering sind, wurden hierzu die übliche Äquivalente nach SN 640 024a [1] verwendet. Für die Verkehrsmenge auf der Kreisfahrbahn wurde in Anlehnung an das Vorgehen bei Knoten ohne Kreisverkehr die Annahme getroffen, dass keine Unterschiede zwischen den Fahrzeugtypen bestehen, da die Fahrzeuge nicht anfahren müssen. Aus diesem Grund wurde hier die Anzahl Fahrzeuge mit der Anzahl PWE gleichgesetzt.

Für die Regressionsanalyse wurden basierend auf den bisherigen Untersuchungen in der Schweiz die beiden folgenden Ansätze verwendet.

$Q_E = a + b \cdot Q_K \quad (\text{linearer Ansatz})$ $Q_E = c + e^{-d \cdot Q_K} \quad (\text{exponentieller Ansatz})$
--

Die Regression wird für jeden Kreisel einzeln, für die Gesamtheit aller Intervalle von allen Untersuchungsobjekten und für verschiedene Teilgruppen bestimmt. Teilgruppen wurden für die folgenden Parameter gebildet:

- Grösse Aussendurchmesser des Kreisels
- Vorhandensein Fahrstreifensignalisation und/oder -markierung bei der Einfahrt
- Verteilung der Verkehrsmengen auf die beiden Fahrstreifen in der Einfahrt
- Vorhandensein Bypass bei der vorangehenden Einfahrt vorhanden

Neben den einzelnen Teilgruppen, wurden auch Kombinationen der Einflussparameter betrachtet, z.B. die Fahrstreifensignalisation kombiniert mit Verteilung der Verkehrsmengen auf die beiden Fahrstreifen der Einfahrt.

3.1.2 Leistungsfähigkeit zweistreifiger Einfahrten

Die Auswertung der Leistungsfähigkeit mit dem Regressionsverfahren wurde für die 17 ausgewählten Kreiselarmlen (siehe Tab. 2.9) einzeln durchgeführt. Als Regressionsansatz wurde sowohl ein linearer als auch ein exponentieller Zusammenhang verwendet und mit dem Regressionskoeffizienten die Güte des Zusammenhangs überprüft. Die Resultate der einzelnen Kreiselarmlen sind in Anhang III zusammengestellt. Eine Übersicht liefert die Abb. 3.9, in welche die Regressionskurven mit dem exponentiellen Ansatz der einzelnen Untersuchungsobjekte dargestellt sind.

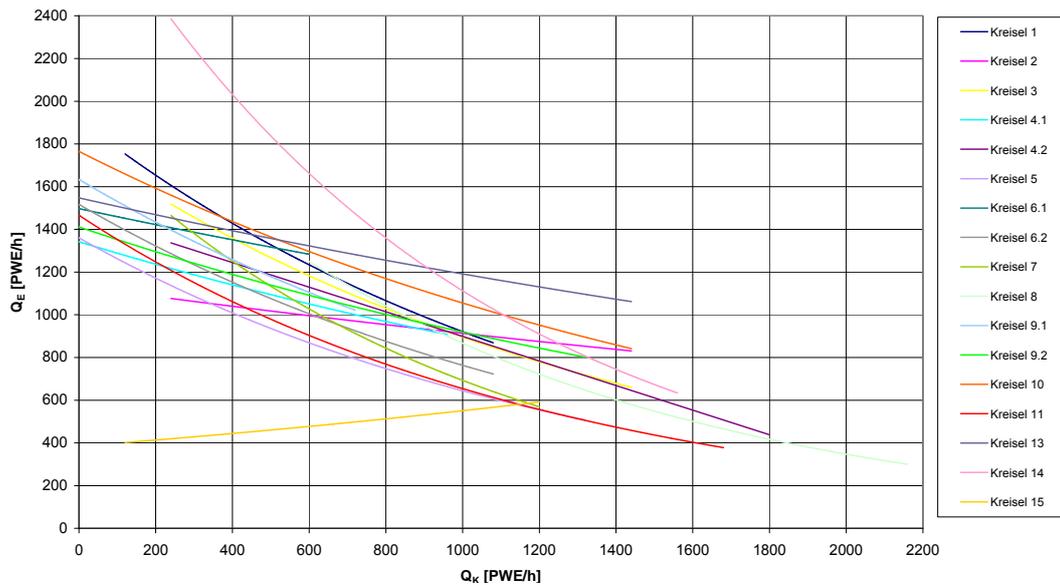


Abb. 3.9 Vergleich Regressionskurven (Exponentialansatz) der untersuchten Kreiselarmer

Der Vergleich der Regressionskurven der einzelnen Kreisel zeigt, dass sich die Leistungsfähigkeiten bei zwei Einfahrten deutlich von den anderen unterscheiden. Einerseits zeigt sich beim Kreisel 14 eine ungewöhnlich grosse Leistungsfähigkeit im Bereich von kleineren Verkehrsmengen auf der Kreisfahrbahn. Umgekehrt verhält es sich beim Kreisel 15, wo die Auswertung eine entgegengesetzte Tendenz ergibt: auch bei kleinen Verkehrsmengen auf der Kreisfahrbahn nur kleine Verkehrsmengen in den Kreisel einfahren können.

Beim Kreisel 14 ergibt sich die sehr hohe Leistungsfähigkeit in den Bereichen mit kleinen Verkehrsmengen auf der Kreisfahrbahn, da dann jeweils auf beiden Fahrstreifen der Einfahrt mehrere Fahrzeuge hintereinander in den Kreisel einfahren können. Dies ist nur dann möglich, wenn vor der Einfahrt immer genügend Fahrzeuge warten. Da dies bei diesem Kreisel im Gegensatz zu den anderen Untersuchungsobjekten sehr häufig der Fall ist und sich die Fahrzeuge zudem beinahe gleichmässig auf die beiden Fahrstreifen verteilen, ergibt sich diese deutlich höhere Leistungsfähigkeit.

Die sehr tiefe Leistungsfähigkeit beim Kreisel 15 ergibt sich dadurch, dass während eines grossen Teils der Beobachtungszeit der Rückstau des benachbarten Knotens bis in den beobachteten Kreisel reichte. Der Verkehrsablauf wurde dadurch gestört, was dazu führt, dass kein Vergleich mit den anderen beobachteten Kreiseinfahrten hinsichtlich der Leistungsfähigkeit möglich ist. Aus diesem Grund wurde der Kreisel 15 bei den Auswertungen der Leistungsfähigkeit mit dem Regressionsverfahren wie auch mit dem Zeitlückenverfahren nicht mehr berücksichtigt.

Für die Auswertung aller Kreisel mit dem Regressionsverfahren standen somit die Beobachtungen von 14 Kreiseinfahrten und total 1412 gesättigten Intervallen zur Verfügung. Wie in Abb. 3.9 ersichtlich, streuen die Leistungsfähigkeitskurven der berücksichtigten Kreiseinfahrten, ausgenommen der oben bereits erwähnten Ausfahrt 14, in einer Bandbreite von 400 bis 600 PWE/h.

Die folgenden zwei Abbildungen zeigen die ermittelten Regressionskurven mit dem exponentiellen sowie mit dem linearen Ansatz.

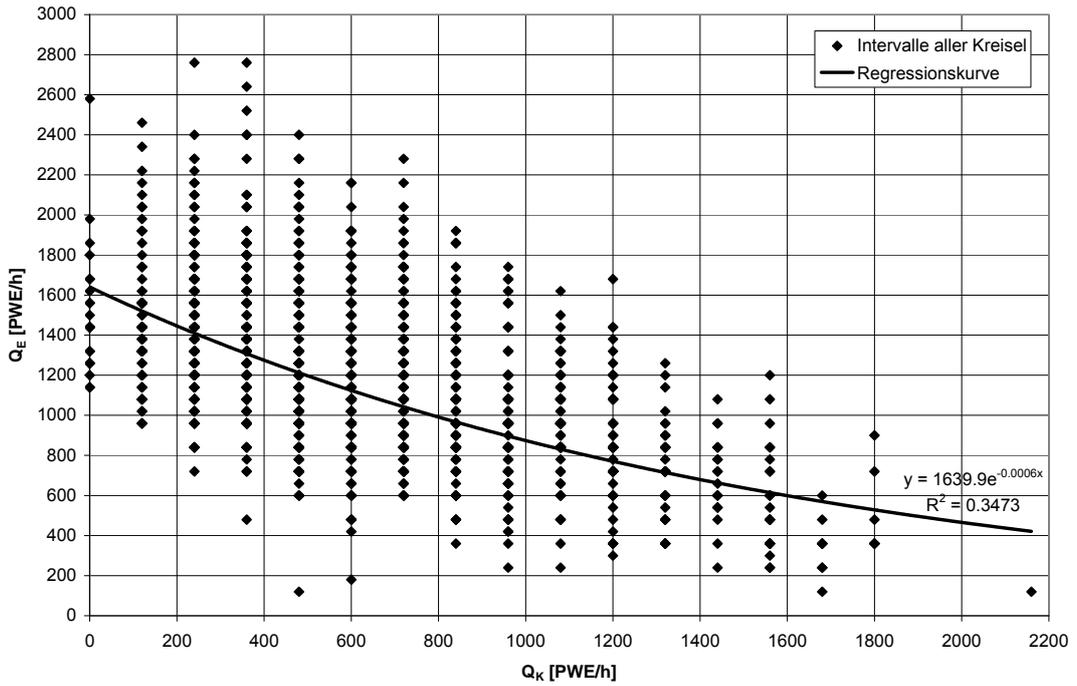


Abb. 3.10 Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn für alle Untersuchungsobjekte (exponentiell)

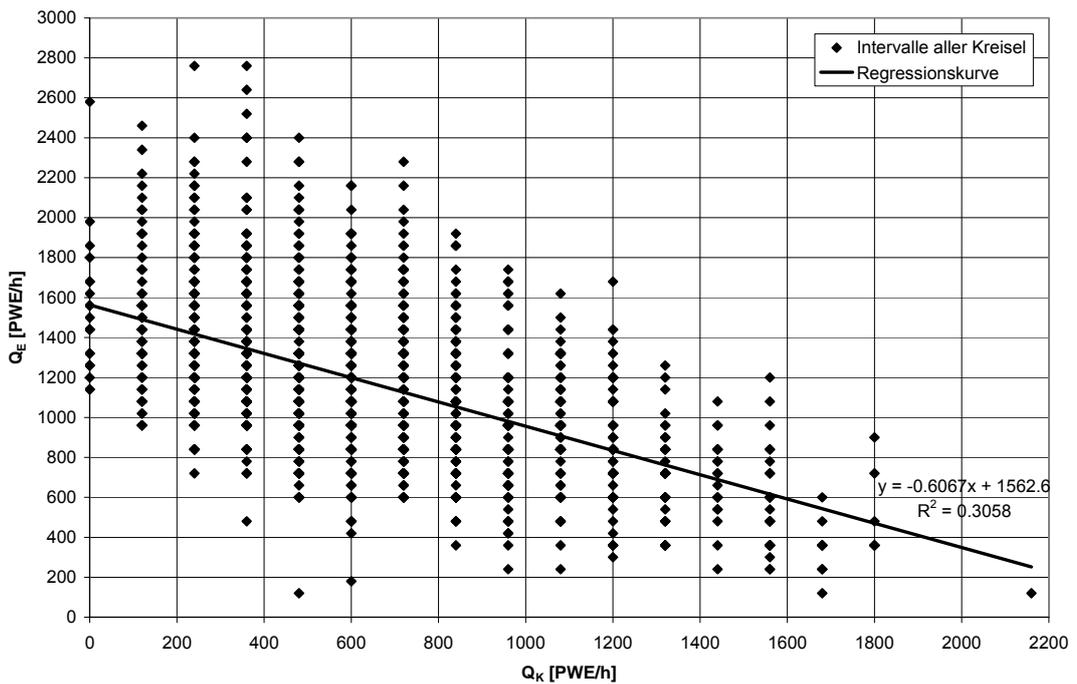


Abb. 3.11 Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn für alle Untersuchungsobjekte (linear)

Die Abb. 3.10 und die Abb. 3.11 zeigen, dass zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn ein Zusammenhang besteht, obwohl bei den einzelnen Intervallen eine grosse Streuung ersichtlich ist.

Die Leistungsfähigkeit der Einfahrten bei einem zweistreifigen Kreisell lässt sich besser mit dem exponentiellen Ansatz beschreiben (vgl. Bestimmtheitsmass R^2). Dieser Ansatz wird für die weiteren Auswertungen in den Vordergrund gestellt.

Zu beachten ist, dass eine Verkehrsmenge über 2000 PWE/h auf der Kreisfahrbahn nur in einem Intervall resultiert. Aus diesem Grund sind die Werte der Regressionskurve ab einem Wert von Q_K grösser als 1800 PWE/h statistisch nicht abgestützt.

3.1.3 Einfluss des Aussendurchmessers auf die Leistungsfähigkeit

Neben der Leistungsfähigkeit der einzelnen Kreiselarme sowie der Gesamtheit aller untersuchten Kreisel waren mögliche Einflüsse von Geometrie- und Betriebsgrössen zu untersuchen.

Um den Einfluss des Aussendurchmessers auf die Leistungsfähigkeit von Einfahrten bei zweistreifigen Kreiseln zu untersuchen, wurde eine Unterteilung in drei Gruppen vorgenommen:

- Aussendurchmesser: < 40 m
- Aussendurchmesser: 40 – 49 m
- Aussendurchmesser: 50 – 60 m

Kreisel mit grossen Aussendurchmessern sind in der Schweiz noch wenig verbreitet. Aus diesem Grund konnten nur zwei Kreisel in die Untersuchung miteinbezogen werden, welche zur Gruppe mit Aussendurchmesser von 50 – 60 m gehören. Mit Hilfe von Datensätzen aus einer momentan laufenden ähnlichen Untersuchung in Deutschland [20] konnte die Datengrundlage im Bereich von mittleren und grossen Aussendurchmesser ergänzt werden. Eine Übersicht über die Kreisel aus Deutschland befindet sich in Anhang VI.

Mit den zusätzlichen Erhebungen aus Deutschland konnten 27 Kreiselarme hinsichtlich des Einflusses des Aussendurchmessers auf die Leistungsfähigkeit untersucht werden. Die Abb. 3.12 zeigt die Regressionskurven für die drei gebildeten Gruppen. In Anhang IV, Ziffer 1 sind die Kurven der Gruppen mit den Einzelwerten der Intervalle dargestellt.

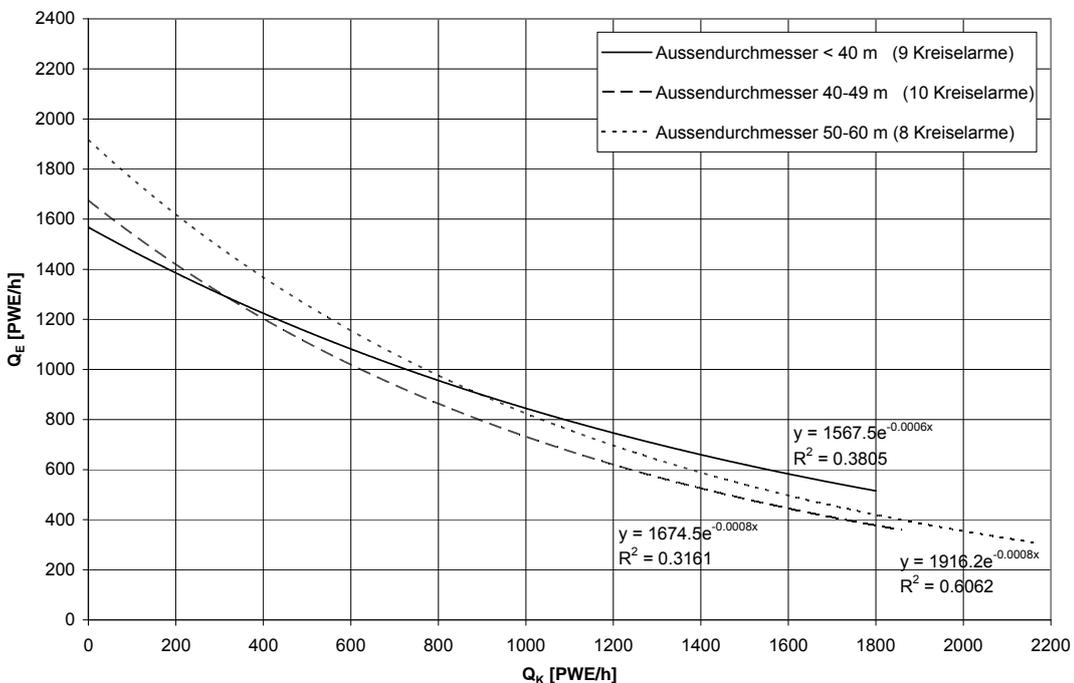


Abb. 3.12 Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn in Abhängigkeit des Aussendurchmessers (exponentiell)

Im Bereich von kleinen Verkehrsmengen auf der Kreisfahrbahn wird die Annahme bestätigt, dass bei einem grösseren Aussendurchmesser eine höhere Anzahl Fahrzeuge in den Kreisel einfahren können. Die Regressionskurve der Gruppe mit Aussendurchmes-

ern von 50 – 60 m befindet sich bis 200 PWE/h über den Regressionskurven der zwei Gruppen mit kleineren Radien. Es zeigt sich jedoch, dass sich die Kurven der Gruppen der kleinsten und grössten Radien im Bereich von $Q_K = 600 - 900$ PWE annähern und danach die Regressionskurve der Gruppe der kleinen Radien sogar höher liegt.

Die Geschwindigkeiten liegen auf der Kreisfahrbahn bei Kreiseln mit kleineren Aussendurchmessern (< ca. 40 m) tiefer als bei Kreiseln mit grossen Aussendurchmessern. Dies kann bei mittleren und hohen Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn einen positiven Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Kreiseinfahrten haben. Vermutlich werden bei niedrigeren Geschwindigkeiten auf der Kreisfahrbahn auch knappe Zeitlücken zum Einfahren ausgenutzt, während dies bei höheren Geschwindigkeiten aus Sicherheitsgründen vermieden wird.

3.1.4 Einfluss der Fahrstreifensignalisation auf die Leistungsfähigkeit

Die vorliegende Untersuchung sollte unter anderem klären, ob sich durch eine geeignete Fahrstreifensignalisation bzw. -markierung eine höhere Leistungsfähigkeit der Einfahrten erzielen lässt. Gemeint ist dabei die Zuweisung zu den einzelnen Fahrstreifen mittels Zielangaben auf Wegweisern oder auf der Fahrbahn sowie durch Markierung von Richtungspfeilen. Aufgrund der geringen Datenmenge konnte keine Unterscheidung nach der Art der Wegweisung, d.h. Bodenmarkierung oder Signalisation gemacht werden.

Die Auswertung liefert ein Ergebnis, das der Hypothese widerspricht, wonach sich durch ein Signalisation bzw. Markierung der Fahrstreifen eine erhöhte Leistungsfähigkeit der Einfahrt erzeugen lässt (siehe Abb. 3.13 bzw. Anhang IV, Ziffer 2). Die Regressionsgerade der Kreiselarmler ohne Signalisation bzw. Markierung liegt sogar deutlich höher als jene der Kreiselarmler mit einer Signalisation oder Markierung.

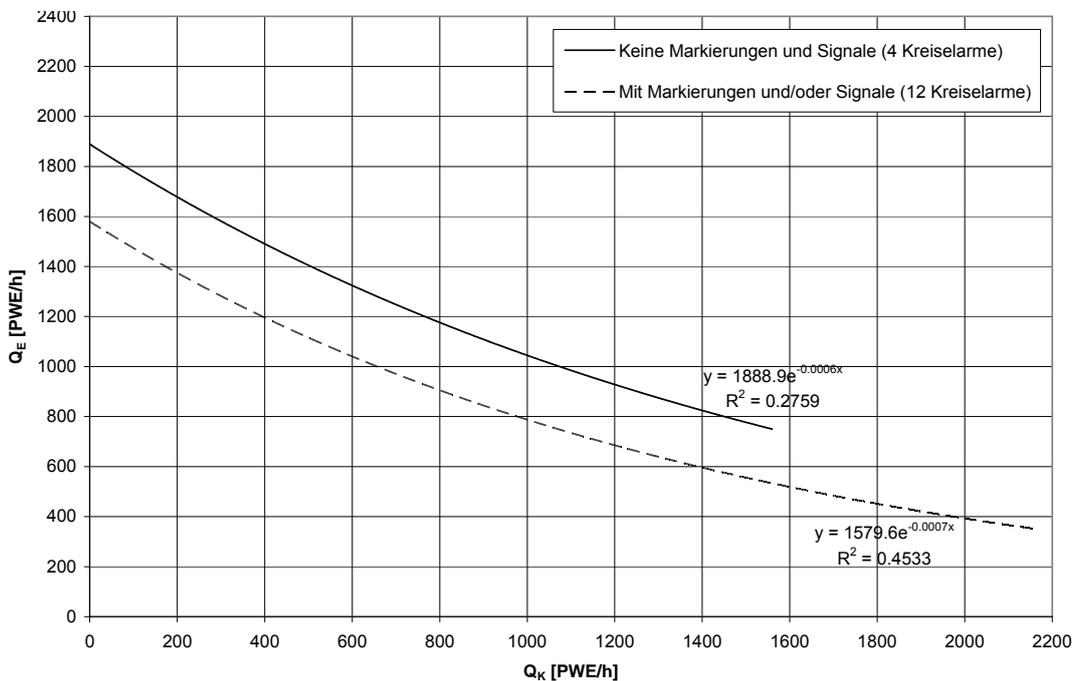


Abb. 3.13 Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn in Abhängigkeit der Markierung und/oder Signalisation der Fahrstreifen (exponentiell)

Grundsätzlich geht man davon aus, dass durch eine Fahrstreifensignalisation bzw. -markierung eine gleichmässige Auslastung der beiden Fahrstreifen in der Einfahrt erreicht werden kann. Eine mögliche Erklärung der unerwarteten Ergebnisse zum Einfluss dieser Signalisationen und Markierungen ergibt sich, wenn man die wirkliche Verteilung der Verkehrsmenge auf die beiden Fahrstreifen betrachtet. Es zeigt sich, dass bei den untersuchten Kreiselnarmen ohne Markierung oder Signalisation die Verteilungen des Verkehrs auf die beiden Fahrstreifen sehr ausgeglichen sind (Tab. 3.15). Im Gegensatz dazu sind auch Kreiseleinfahrten mit Signalisation und/oder Markierung vorhanden, welche eine sehr ungleichmässige Verteilung des Verkehrs aufweisen (siehe Tab. 3.16).

Tab. 3.15 Vergleich durchschnittlicher Verkehrsanteil auf dem linken Fahrstreifen der Einfahrt

Markierungen und/oder Signale	ϕ Anteil linker FS [%]
Mit Markierungen und/oder Signale	0.37
Ohne Markierungen und Signale	0.49

Tab. 3.16 Übersicht Anteil des Verkehrs auf dem linken Fahrstreifen der Einfahrt sowie FS-Signalisation bzw. -markierung sortiert nach Verkehrsmengenanteil auf dem linken Fahrstreifen

Nr.	Kreisel	Anteil Verkehr FS links [%]	FS-Signalisation bzw. -markierung
5	Löwenberg, Rtg. A1	2	Ja
6.2	Lavapesson, Route de Morat Rtg. Fribourg	12	Ja
8	Schlund, Anschluss A2 Rtg. Nord	24	Ja
6.1	Lavapesson, Route de Morat Rtg. A12	28	Ja
2	Avry-sur-Matran, Route de Fribourg	31	Ja
9.1	Glockenstrasse, Surentalstrasse Rtg. Zentrum	33	Ja
11	Adlerkreuzung, Zollstrasse	35	Ja
4.1	Bois des Morts, Route de Neyruz	47	Ja
9.2	Glockenstrasse, Surentalstrasse Rtg. AB	49	Ja
4.2	Bois des Morts, Route de la Pâla	57	Ja
1	Frenkendörferstrasse, Rtg. Liestal	64	Ja
7	Chenevière, Rtg. Cormagens	65	Ja
13	Povro, Via Bioggio Rtg. Lugano	46	Nein
14	Genevrier, Route du Rio Grédon	47	Nein
10	Schlottermilch, Schlottermilch	52	Nein
3	Avry-Centre, Route de Matran	53	Nein

Mit der vorliegenden Datengrundlage liess sich die Frage hinsichtlich der Zweckmässigkeit einer Fahrstreifensignalisation oder -markierung nicht klären. Es zeigte sich aber, dass der Einfluss der Verteilung des Verkehrs auf die beiden Fahrstreifen einen Einfluss hat. Aus diesem Grund wurde dieser Einflussfaktor noch weiter untersucht.

3.1.5 Einfluss der Verkehrsverteilung in der Einfahrt auf die Leistungsfähigkeit

Die höchste Leistungsfähigkeit der Einfahrt sollte theoretisch bei einer gleichmässigen Verteilung des Verkehrs auf die beiden Fahrstreifen der Einfahrt erreicht werden. Um dies zu überprüfen, wurden vier Gruppen gebildet:

- Anteil Verkehrsbelastung auf linkem Fahrstreifen: < 20 %
- Anteil Verkehrsbelastung auf linkem Fahrstreifen: 20 % – 40%
- Anteil Verkehrsbelastung auf linkem Fahrstreifen: 40 % – 60%
- Anteil Verkehrsbelastung auf linkem Fahrstreifen: > 60 %

Die Regressionskurven der vier Gruppen sind in Abb. 3.14 ersichtlich (vgl. Anhang IV, Ziffer 3). Zu beachten ist, dass bei den Gruppen mit sehr geringem (< 20 %) und sehr hohem (> 60 %) Anteil der Verkehrsmenge auf dem linken Fahrstreifen in der Einfahrt nur Daten von jeweils zwei Kreiselarmen zur Verfügung standen.

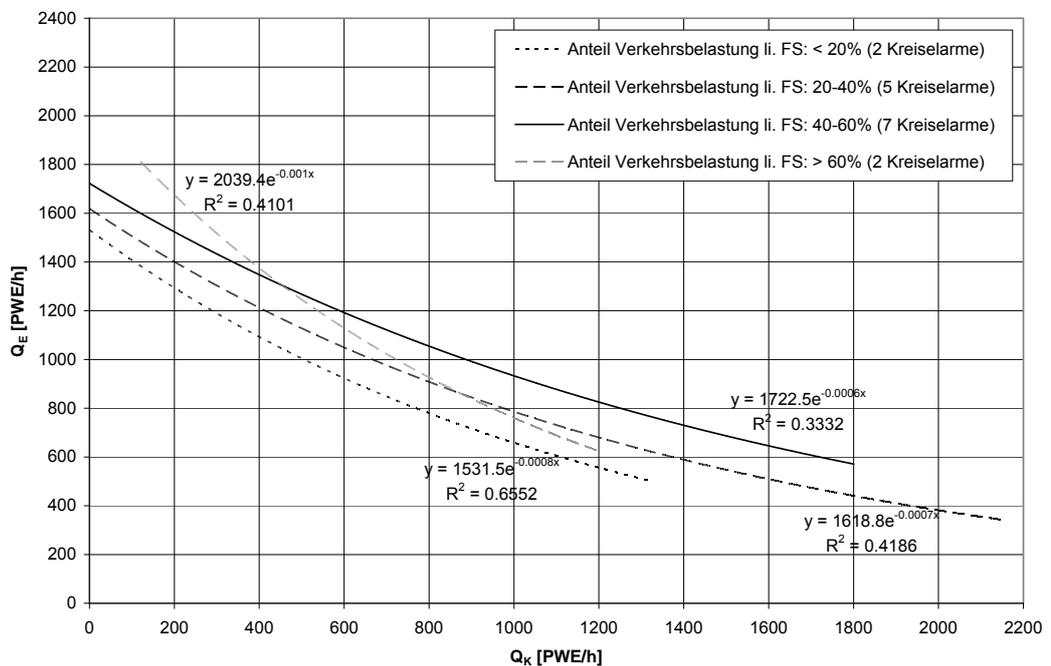


Abb. 3.14 Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn in Abhängigkeit der Verteilung der Verkehrsmengen auf beide Fahrstreifen in der Einfahrt (exponentiell)

Die Auswertung der Gruppen verschiedener Fahrstreifenbelastungen in den Einfahrten zeigt, die höchste Leistungsfähigkeit wird dann erreicht, wenn sich der Verkehr gleichmässig auf beide Fahrstreifen verteilt. Durch eine gute Verteilung auf die beiden Fahrstreifen können die vorhandenen Lücken im Verkehr auf der Kreisfahrbahn von mehr Fahrzeugen in der Einfahrt ausgenutzt werden, als wenn sich die Fahrzeuge nur auf einem Fahrstreifen zum Einfahren aufstellen.

Bei der Gruppe mit dem höchsten Verkehrsanteil auf dem linken Fahrstreifen ergibt sich im Bereich von kleinen Verkehrsmengen im Kreisel eine dieser Feststellung gegenüber widersprechende Regressionskurve. Hier muss aber die geringe Datenmenge (nur zwei Kreiselarme) beachtet werden.

Allgemein ergab sich bei einer gleichmässigen Verteilung der Verkehrsmenge auf beide Fahrstreifen ($50\% \pm 10\%$) eine um ca. 150 PWE/h höhere Leistungsfähigkeit als bei den Gruppen mit etwas schlechterer Verteilung (Anteil linker Fahrstreifen = 20 – 40 % bzw. > 60 %). Bei einem sehr tiefen Anteil auf dem linken Fahrstreifen (< 20 %) zeigten sich noch tiefere Leistungsfähigkeiten.

Die Resultate der Gruppenvergleiche der Fahrstreifensignalisation bzw. -markierung und der Fahrstreifenbelastung zeigen, dass die vorhandene Verteilung des Verkehrs auf die Fahrstreifen der Einfahrt der massgebende Parameter für die Leistungsfähigkeit ist. Diese Verteilung kann unter Umständen durch eine Signalisation oder Markierung der Fahrstreifen positiv beeinflusst werden. Die Verteilung kann jedoch nur in einem kleinen Mass beeinflusst werden, da sie durch die Verkehrsverteilung bzw. Routen der Verkehrsteilnehmer weitgehend vorgegeben ist. Deshalb ist es wichtig, dass bei der Dimensionierung eines zweistreifigen Kreisels diese Einflüsse vorgängig beurteilt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Leistungsfähigkeiten aus den Bemessungskurven bei einer stark ungleichmässigen Verteilung des Verkehrs in der Einfahrt oft nicht erreicht werden können.

3.1.6 Einfluss eines Bypasses auf die Leistungsfähigkeit

Durch die Anordnung eines Bypasses bei einer Kreiseinfahrt verändert sich der Verkehrsablauf bei der folgenden Einfahrt (Abb. 3.15). Die Fahrzeuge, welche sonst in der nächsten Ausfahrt den Kreisel wieder verlassen, fahren via Bypass gar nicht in den Kreisel ein. Die Fahrzeuge in der folgenden Einfahrt werden durch diese Fahrzeuge kaum noch beeinflusst.

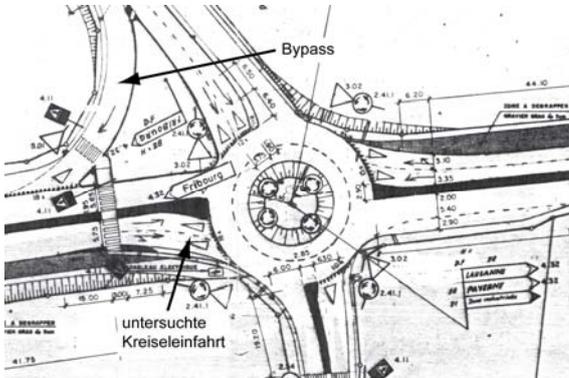


Abb. 3.15 Übersicht Untersuchungsanordnung Einfluss Bypass

Bei der Darstellung der Leistungsfähigkeit durch den Zusammenhang von Q_E und Q_K erscheint diese Beeinflussung nicht direkt, da nur die Fahrzeuge gezählt werden, welche sich auf Höhe der Einfahrt noch im Kreisel befinden. Dass diese Beeinflussung aber vorhanden ist, zeigt die Auswertung der Wirkung eines Bypasses in der voranliegenden Einfahrt. Durch den Bypass wird die Anzahl der Fahrzeuge reduziert, welche nicht bei Q_K erscheinen, aber die einfahrenden Fahrzeuge trotzdem beeinflussen. Dadurch ergibt sich bei gleichbleibender Verkehrsmenge auf der Kreisfahrbahn eine höhere Menge an einfahrenden Fahrzeugen (Abb. 3.16).

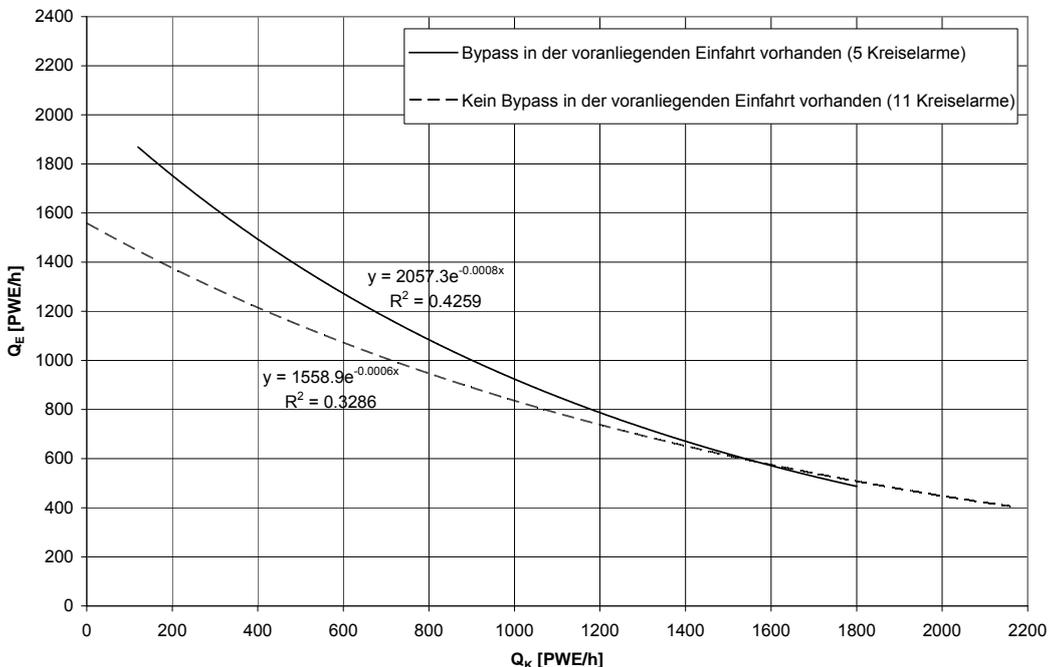


Abb. 3.16 Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn mit/ohne Bypass in der vorangehenden Einfahrt (exponentiell)

Bei kleineren bis mittleren Verkehrsmengen auf der Kreisfahrbahn ergibt sich bei Einfahrten mit einem Bypass in der voranliegenden Einfahrt eine höhere Leistungsfähigkeit. Hingegen bei hohen Verkehrsmengen auf der Kreisfahrbahn ergeben sich für die Leistungsfähigkeit der Einfahrt keine Unterschiede.

Dieser Zusammenhang zeigt, dass bei der Dimensionierung eines Kreisels nicht nur die Verkehrsmengen in den Einfahrten und auf der Kreisfahrbahn beachtet werden müssen. Es ist notwendig, dass der gesamte Verkehrsablauf am Kreisel analysiert wird um allfällige negative oder auch positive Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit erkennen und beurteilen zu können. Eine allgemeine Empfehlung hinsichtlich der Anordnung eines Bypasses lässt sich daraus aber nicht ableiten.

3.2 Leistungsfähigkeit der Einfahrten aus der Zeitlückentheorie

3.2.1 Vorbemerkungen

Bei der Videoauswertung wurde der zeitliche Ablauf der Fahrzeuge in der Einfahrt und auf der Kreisfahrbahn bestimmt und daraus die Grössen der abgelehnten und angenommenen Zeitlücken berechnet. Basierend auf diesen Daten wurde für jede beobachtete Kreiseleinfahrt mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode die Grenzzeitlücke bestimmt sowie die mittlere Folgezeitlücke (arithmetisches Mittel) berechnet.

Der Kreisel 12 wurde bereits zu Beginn der Untersuchung für die Leistungsfähigkeitsbetrachtung aufgrund der geringen Belastung ausgeschlossen. Bei der Auswertung mit der Regressionsmethode zeigte sich, dass auch der Kreisel 15 für die Auswertungen nicht zu verwenden ist, da der Verkehrsablauf durch den Rückstau eines benachbarten Knotens beeinflusst wird. Die Daten dieser beiden Kreisel wurden auch für die Auswertungen der Grenzzeitlücken nicht miteinbezogen. Somit standen hier die Daten von 13 Kreiseln und 16 Einfahrten zur Verfügung (siehe Tab. 3.17). Insgesamt wurden 2013 Zeitlücken ausgewertet.

Tab. 3.17 Übersicht untersuchte Kreiseleinfahrten

Nr.	Kreisel	t_g	t_f
1	Frenkendörferstrasse, Rtg. Liestal	4.16	2.46
2	Avry-sur-Matran, Route de Fribourg	3.86	2.50
3	Avry-Centre, Route de Matran	4.31	2.27
4.1	Bois des Morts, Route de Neyruz	4.33	2.47
4.2	Bois des Morts, Route de la Pâla	3.68	2.61
5	Löwenberg, Rtg. A1	3.58	2.63
6.1	Lavapesson, Route de Morat Rtg. A12	- *	2.51
6.2	Lavapesson, Route de Morat Rtg. Fribourg	4.03	2.41
7	Chenevière, Rtg. Cormagens	4.23	2.53
8	Schlund, Anschluss A2 Rtg. Nord	3.22	2.36
9.1	Glockenstrasse, Surentalstrasse Rtg. Zentrum	3.93	2.61
9.2	Glockenstrasse, Surentalstrasse Rtg. AB	4.29	2.59
10	Schlottermilch, Schlottermilch	3.88	2.59
11	Adlerkreuzung, Zollstrasse	3.94	2.76
13	Povro, Via Bioggio Rtg. Lugano	3.49	2.58
14	Genevrier, Route du Rio Grédon	4.28	2.34
Mittelwert		3.92	2.52
* Grenzzeitlücke konnte nicht bestimmt werden			

Die Unterschiede der Grenzzeitlücken mit mehr als 1 Sekunde sind recht gross. Bei der Folgezeitlücke unterscheiden sich die Werte mit einer Differenz von 0.5 Sekunden etwas weniger.

Für die Auswertung der Leistungsfähigkeit mit der Zeitlückentheorie wurden zuerst die Grenz- und Folgezeitlücken jedes Kreisels einzeln in die unter 2.3.4 beschriebenen Formeln von Siegloch, Wu und Brilon eingesetzt, um die Streuung der Einzelkreisel aufzuzeigen (vgl. Anhang V). Anschliessend wurden die Mittelwerte der Grenz- und Folgezeit-

lücken über alle Kreisel in die Leistungsfähigkeitsformeln eingesetzt und miteinander verglichen.

3.2.2 Leistungsfähigkeit nach Siegloch-Formel

Um eine erste Annäherung der Leistungsfähigkeit der zweistreifigen Kreisel zu erhalten, wurden die Mittelwerte der Grenz- und Folgezeitlücken in die Formel von Siegloch [18] für die Berechnung der Leistungsfähigkeit bei vortrittsgeregelte Knoten eingesetzt (Abb. 3.17).

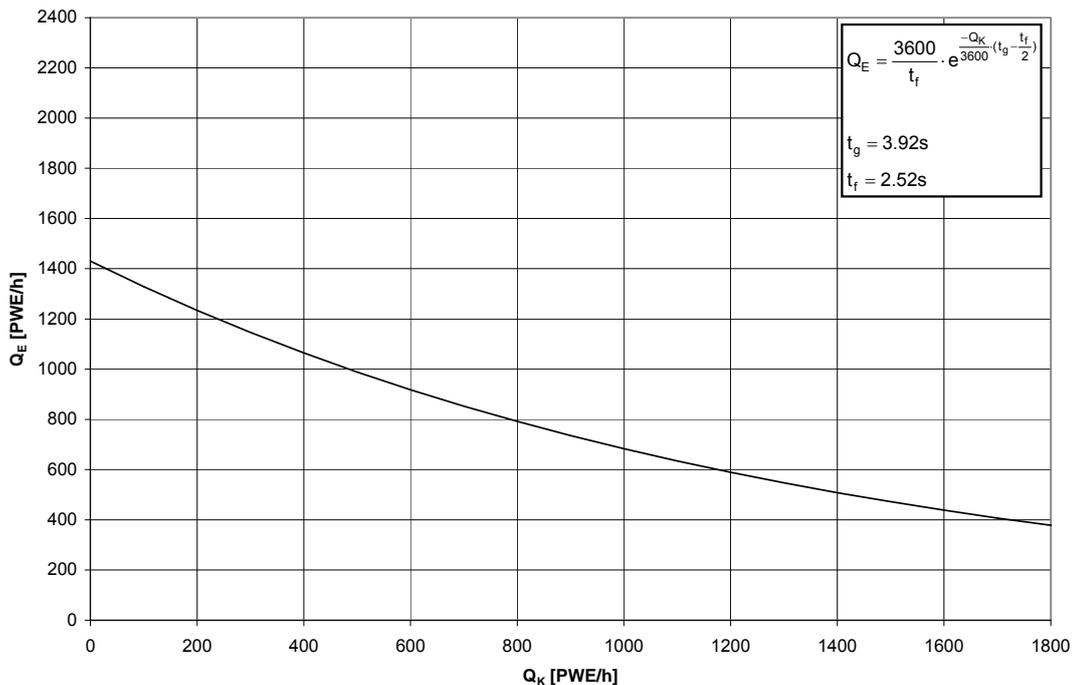


Abb. 3.17 Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn mit Siegloch-Formel und Mittelwerten der Grenz- und Folgezeitlücke aller Kreiseinfahrten

Mit der Formel von Siegloch wird die Anzahl der Fahrstreifen in der Einfahrt nur indirekt über die Grenz- und Folgezeitlücken berücksichtigt. Die Grenz- und Folgezeitlücken wurden über beide Fahrstreifen der Einfahrt bestimmt.

Die maximale Verkehrsmenge in der Einfahrt ($Q_K = 0$ PWE/h) wurde mit 1430 PWE/h berechnet, bei einer Verkehrsmenge von 1'000 PWE/h auf der Kreisfahrbahn ergibt sich für die Einfahrt eine Kapazität von ca. 700 PWE/h.

Bei der Interpretation der Resultate ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Siegloch-Formel nicht für zweistreifige Kreiseinfahrten entwickelt wurde. Sie wurde in dieser Untersuchung lediglich zu Vergleichszwecken einbezogen.

3.2.3 Leistungsfähigkeit nach Wu-Formel

Bei der Berechnung der Leistungsfähigkeit von Kreiseln nach Wu [21] wird einerseits die Kolonnenbildung auf dem Hauptstrom (Kreisfahrbahn), andererseits die Anzahl der Fahrstreifen in der Einfahrt und auf der Kreisfahrbahn berücksichtigt (Abb. 3.18). Für die Mindestzeitlücke auf der Kreisfahrbahn (Δ) wurde nach HBS [8] 2.1 s eingesetzt.

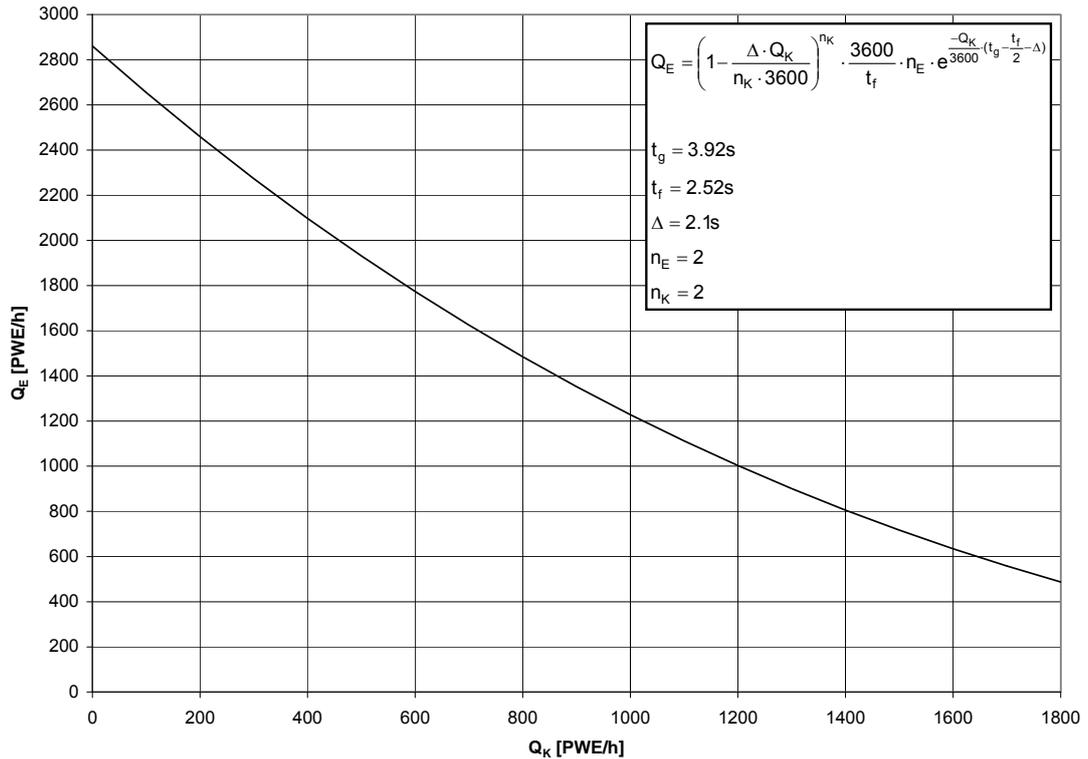


Abb. 3.18 Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn mit Wu-Formel und Mittelwerten für Grenz- und Folgezeitlücke aller Kreiseinfahrten

Durch die Berücksichtigung der Anzahl der Fahrstreifen in der Einfahrt, wird der maximale Wert der Verkehrsmenge in der Einfahrt ($Q_K = 0$ PWE/h) verdoppelt, was ein $Q_{E,max} = 2861$ PWE/h ergab. Auch bei einer Verkehrsmenge von 1000 PWE/h auf der Kreisfahrbahn ist der Wert der Kapazität der Einfahrt mit ca. 1200 PWE/h noch hoch.

Der Einbezug des zweiten Fahrstreifens in der Einfahrt mit dem Faktor 2 in der Formel führt offensichtlich zu einer Überschätzung des Einflusses. Einerseits wird die Annahme getroffen, dass beide Fahrstreifen der Einfahrt gleichmässig ausgelastet sind, andererseits wird der Einfluss des zweiten Fahrstreifens zusätzlich indirekt über die Grenz- und Folgezeitlücken berücksichtigt.

Die Abminderung der Leistungsfähigkeit der Einfahrt durch die Berücksichtigung der Kolonnenbildung auf der Kreisfahrbahn wird mit zunehmender Menge grösser. Der Effekt dieser Abminderung ist aber im Bereich von kleinen bis mittleren Verkehrsmengen auf der Kreisfahrbahn deutlich schwächer als der Einfluss der Berücksichtigung des zweiten Fahrstreifens mit dem Faktor 2.

3.2.4 Leistungsfähigkeit nach Brilon

Die oben beschriebene Überschätzung des Einflusses des zweiten Fahrstreifens in der Einfahrt in der Formel von Wu [21] haben Brilon und Bäumer in der Untersuchung von zweistreifigen Kreisverkehren [7] mit Hilfe eines Vergleiches mit dem Regressionsverfahren feststellen können. Basierend auf dieser Forschungsarbeit schlagen sie eine Formel zur Berechnung der Leistungsfähigkeit von Kreiseln basierend auf der Siegloch-Formel vor. Dabei wird der Einfluss des zweiten Fahrstreifens in [12] mit dem Faktor 1.14 berücksichtigt.

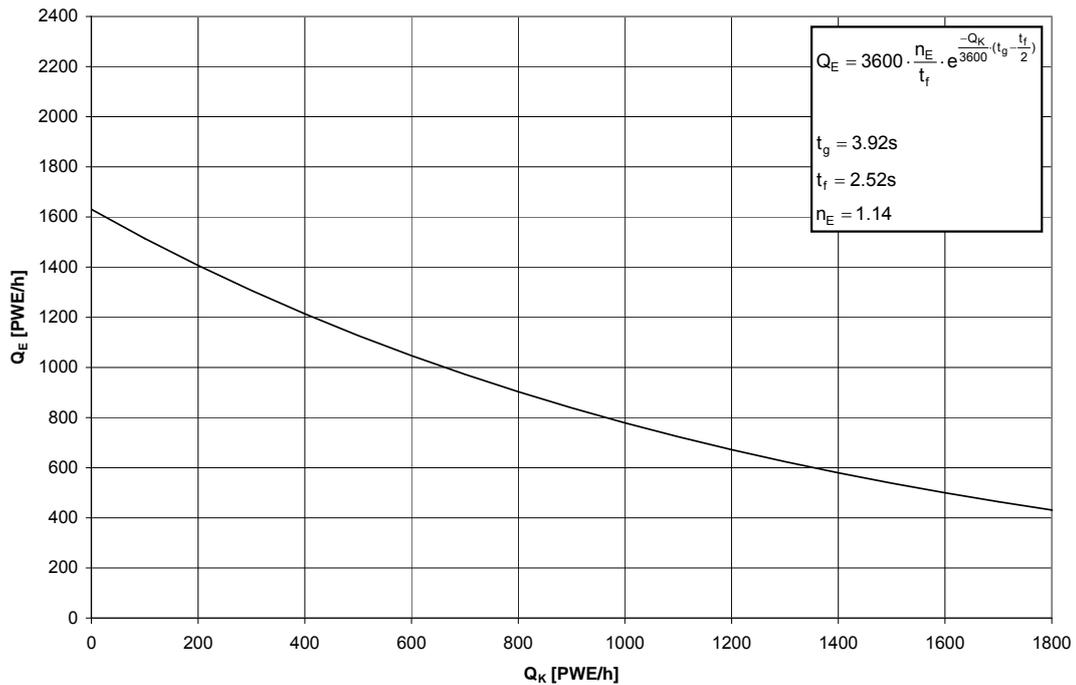


Abb. 3.19 Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn mit Siegloch-Formel und Mittelwerten für Grenz- und Folgezeitlücke aller Kreiseinfahrten

Mit dem ersatzweiseverwendeten Faktor 1.14 nach [12] zur Berücksichtigung der Anzahl der Fahrstreifen in der Einfahrt ergibt sich bei $Q_K = 0$ PWE/h ein $Q_{E,max} = 1631$ PWE/h und bei einer Verkehrsmenge von 1000 PWE/h auf der Kreisfahrbahn ist der Wert der Kapazität der Einfahrt ca. 800 PWE/h.

3.2.5 Vergleich der Ansätze zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit mit Hilfe der Zeitlückentheorie

Die Abb. 3.20 zeigt einen Vergleich der Kurven der drei Ansätze für die Bestimmung der Leistungsfähigkeit von zweistreifigen Kreiseln mit Hilfe der Zeitlücken. Die Abbildung verdeutlicht die obenstehenden Aussagen zu den Einflüssen der einzelnen Faktoren.

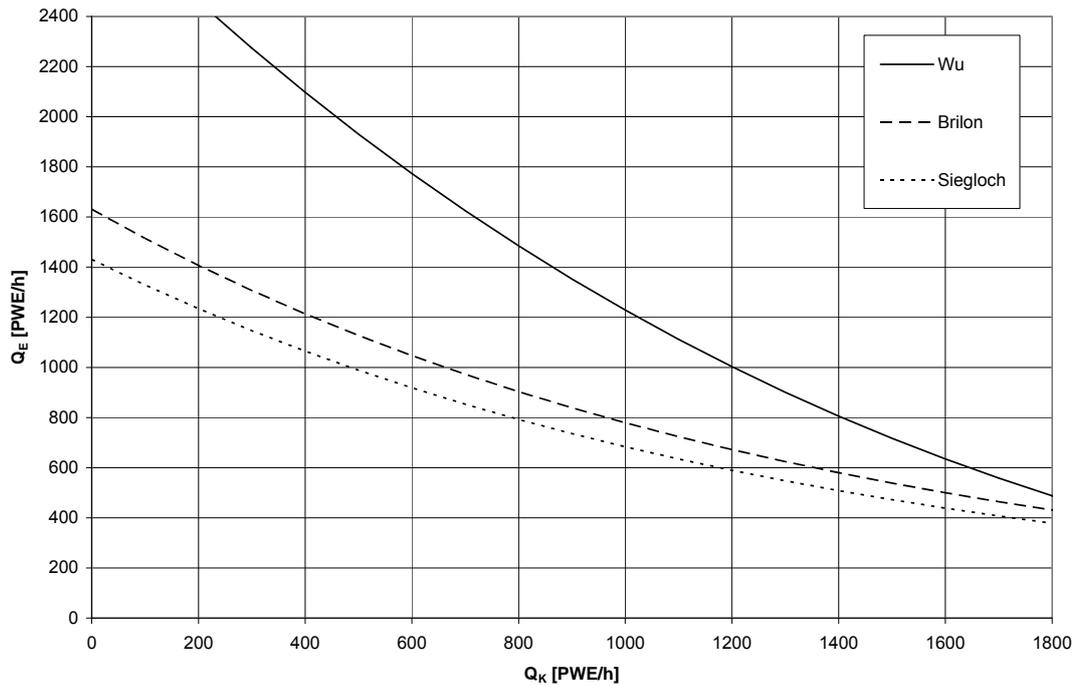


Abb. 3.20 Vergleich der Ansätze Zeitlückenverfahren Siegloch, Wu und Brilon

3.3 Leistungsfähigkeit ein- und zweistreifiger Ausfahrten

Für die Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Ausfahrten bei zweistreifigen Kreiseln konnten 7 Ausfahrten der Untersuchungsobjekte berücksichtigt werden. Weitere Ausfahrten konnten aufgrund der zu kleinen Verkehrsmenge oder des Bildausschnittes auf den Videos nicht ausgewertet werden.

Bei den 7 untersuchten Kreiselausfahrten handelt es sich um 4 einstreifige und 3 zweistreifige Ausfahrten. Weitere Merkmale wie der Ausfahrtsradius oder die Fahrbahnbreite der Ausfahrt wurden aufgrund der kleinen Datenmenge nicht unterschieden. Wiederum konnte der Einfluss der Fußgänger nicht beurteilt werden, da nur bei drei Ausfahrten Fußgängerstreifen vorhanden waren. Zudem zeigten die Videoauswertungen, dass aufgrund der geringen Fußgänger Menge wenn überhaupt nur eine sehr kleine Beeinflussung der ausfahrenden Fahrzeuge stattfand.

Basierend auf der Videoauswertung der 7 Ausfahrten wurden wiederum gesättigte 30 Sekunden Intervalle herausgefiltert und die Verkehrsmengen auf eine Stunde hochgerechnet und ihre Verteilung untersucht. Für jede Ausfahrt wurde der Mittelwert der Verkehrsmengen aller gesättigten Intervalle bestimmt. Darauf basierend wurde mit dem gewichteten Mittelwert die Leistungsfähigkeit der einstreifigen und zweistreifigen Ausfahrten berechnet.

Die folgenden Tabellen zeigen die ermittelten Verkehrsmengen für einstreifige (Tab. 3.18) bzw. zweistreifige (Tab. 3.19) Ausfahrten bei zweistreifigen Kreiseln.

Tab. 3.18 Leistungsfähigkeit einstreifige Ausfahrten

Nr.	Kreisel	Ausfahrt	Anzahl gesättigte Intervalle	Mittelwert [Fz/h]	Standardabw. [Fz/h]
3	Avry-Centre	Route de Matran (Arm 3)	8	1650	167
6	Lavapesson	Route de Morat Rtg. A12	74	1708	157
6	Lavapesson	Route de Morat Rtg. Fribourg	22	1615	151
10	Schlottermilch	Surentalstrasse	23	1748	207
Gewichteter Mittelwert [Fz/h]				1695	

Tab. 3.19 Leistungsfähigkeit zweistreifige Ausfahrten

Nr.	Kreisel	Ausfahrt	Anzahl gesättigte Intervalle	Mittelwert [Fz/h]	Standardabw. [Fz/h]
4	Bois des Morts	Route de Neyruz (Arm 3)	35	1721	157
9	Glockenstrasse	Surentalstrasse Rtg. AB	28	1997	260
9	Glockenstrasse	Surentalstrasse Rtg. Zentrum	14	1911	238
Gewichteter Mittelwert [Fz/h]				1856	

Gemäss dieser Berechnung ergibt sich für einstreifige Ausfahrten eine mittlere Leistungsfähigkeit von ca. 1700 Fz/h. Für zweistreifige Ausfahrten wird mit ca. 1850 Fz/h eine um ca. 150 Fz/h höhere Leistungsfähigkeit bestimmt.

Es zeigt sich, dass auch mit einer einstreifigen Ausfahrt hohe Leistungsfähigkeiten erreicht werden. Zum Vergleich liegen die Werte der einstreifigen Ausfahrten im Bereich der Sättigungsverkehrsmenge eines Fahrstreifens wie sie an LSA-gesteuerten Knoten erhoben wurden (1800 bis 2000 Fz/h). Weiter kann festgestellt werden, dass mit zweistreifigen Ausfahrten eine leicht höhere Leistungsfähigkeit als mit einer einstreifigen Ausfahrt erreicht werden kann. Diese Unterschiede sind jedoch relativ klein.

3.4 Unfallgeschehen zweistreifiger Kreisel

3.4.1 Vorbemerkungen

Für die Auswertung des Unfallgeschehens an zweistreifigen Kreiseln konnten bis auf eine Ausnahme (fehlende Unterlagen) alle Untersuchungsobjekte verwendet werden. Im Anhang II befindet sich eine Zusammenstellung der Untersuchungsobjekte mit Angaben zur Geometrie, zu den Verkehrsmengen und zum Unfallgeschehen.

Es ist zu beachten, dass sich die Angaben zu den Unfällen sowie zu den Verkehrsmengen bezüglich Detaillierungsgrad bei den einzelnen Kreiseln deutlich unterscheiden. Aus diesem Grund können nicht bei allen Auswertungen alle Kreisel miteinbezogen werden. Weiter konnte bei der Analyse der Örtlichkeit der Unfälle weder zwischen dem inneren und äusseren Fahrstreifen auf der Kreisfahrbahn unterschieden werden, noch konnte bei der Einfahrt eine Zuordnung der Unfälle zum rechten und zum linken Fahrstreifen vorgenommen werden.

3.4.2 Unfall- und Verunfalltenhäufigkeit

An den 14 Kreiseln, welche in die Auswertung des Unfallgeschehens miteinbezogen wurden, ereigneten sich in den verschiedenen Untersuchungszeiträumen total 254 Unfälle. Die Tab. 3.20 zeigt die Verteilung der Unfälle (U) und der Verunfallten (VU) auf die einzelnen Kreisel.

Tab. 3.20 Anzahl Unfälle und Verunfallte je Kreiseln

	Kreisel-Nr.															Total
	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15		
Anz. U	16	11	8	18	5	6	10	28	6	12	35	19	34	46	254	
Anz. VU	10	7	1	3	2	1	3	4	1	3	7	k.A.	k.A.	6	48	
Beob.dauer (J)	3	5	5	5	5	5	4.5	4.5	2	5	5	5	8	5		

Um eine Vergleichsmöglichkeit zwischen den Unfallzahlen der einzelnen Kreisel zu schaffen, sind in der folgenden Tabelle die Unfälle pro Jahr dargestellt.

Tab. 3.21 Anzahl Unfälle und Verunfallte pro Jahr je Kreisel

	Kreisel-Nr.															Durchschnitt
	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15		
Anz. U pro Jahr	5.3	2.2	1.6	3.6	1.0	1.2	2.2	6.2	3.0	2.4	7.0	3.8	4.3	9.2	3.79	
Anz. VU pro Jahr	3.3	1.4	0.2	0.6	0.4	0.2	0.7	0.9	0.5	0.6	1.4	k.A.	k.A.	1.2	0.95	
U _s	0.63	0.64	0.13	0.17	0.40	0.17	0.30	0.14	0.14	0.25	0.20	k.A.	k.A.	0.13	0.28	

Durchschnittlich ereigneten sich bei den untersuchten Kreiseln 3.79 Unfälle pro Jahr, wobei sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Kreiseln zeigen. So ereignete sich bei Kreisel 5 durchschnittlich nur 1 Unfall pro Jahr, bei Kreisel 15 wurden hingegen durchschnittlich mehr als 9 Unfälle pro Jahr registriert.

Die durchschnittliche Verunfalltenzahl liegt mit 0.95 Personen pro Jahr tief, wobei auch hier relativ grosse Streuungen zu beobachten sind. Hinzuzufügen ist, dass sich während der Beobachtungsdauer an keinem Kreisel ein tödlicher Unfall ereignet hat.

Wie die Unfall- bzw. Verunfalltenzahlen pro Jahr streut die Unfallschwere, bei der die Anzahl der Verunfallten in Beziehung zur Anzahl Unfälle gestellt werden, ebenfalls stark. Die mittlere Unfallschwere liegt bei 0.28, die maximale Unfallschwere aber bei 0.64.

3.4.3 Örtliche Verteilung der Unfälle

Die Unfälle wurden bezüglich ihrer Lage im Kreisel sowie bezüglich Unfalltyp ausgewertet. Diese Auswertung soll allfällige typische Unfälle für zweistreifige Kreisel aufzeigen. Im Anhang II ist für jeden Kreisel eine grafische Übersicht des Unfallgeschehens mit der Verteilung der Unfälle auf dem Kreisel sowie Angaben zur Unfalltypengruppe enthalten.

Die Tab. 3.22 zeigt die Verteilung aller Unfälle auf die verschiedenen Orte eines Kreisels.

Tab. 3.22 Verteilung Unfallorte

	Unfälle	
Einfahrtsbereich	109	(42.9 %)
Kreisfahrbahn	96	(37.8 %)
Ausfahrtsbereich	46	(18.1 %)
Keine Angaben	3	(1.2 %)
Total	254	(100 %)

Im Einfahrtsbereich ereigneten sich mit fast 43 % die meisten Unfälle. Nur knapp weniger Unfälle geschahen auf der Kreisfahrbahn. Im Ausfahrtsbereich ereigneten sich dagegen nur 18 % der Unfälle.

Um die Verteilung der Verunfallten auf die Örtlichkeit zu betrachten, konnten die Kreisel 13 und 14 nicht mitberücksichtigt werden, da keine Angabe über Verunfallte vorhanden waren. Die Tab. 3.23 zeigt einerseits die angepasste Verteilung der Unfälle auf die Örtlichkeiten sowie die Verteilung der Verunfallten und die Unfallschwere. Für die Bestimmung der Unfallschwere wird die Anzahl Verunfallten durch die Anzahl Unfälle geteilt.

Tab. 3.23 Verteilung Unfallorte ohne Unfälle der Kreisell Nr. 13 und 14

	Unfälle	Verunfallte	Unfallschwere
Einfahrtsbereich	90 (44.8 %)	28 (58.3 %)	31.1 %
Kreisfahrbahn	80 (40.3 %)	9 (18.8 %)	11.1 %
Ausfahrtsbereich	29 (14.4 %)	11 (22.9 %)	37.9 %
Keine Angaben	1 (0.5 %)	0 (0.0 %)	0.0 %
Total	201 (100 %)	48 (100 %)	23.9 %

Die Verteilung der Unfälle auf die verschiedenen Unfallorte ist sehr ähnlich wie jene der gesamten Stichprobe. Daher kann davon ausgegangen werden, dass auch die verkleinerte Stichprobe aussagekräftig ist.

Der Einfahrtsbereich liegt hinsichtlich Häufigkeit der Unfälle und Anzahl Verunfallte an erster Stelle. Bei der Unfallschwere fällt dagegen der Ausfahrtsbereich negativ auf. Es zeigt sich, dass sich im Ausfahrtsbereich zwar wenige, dafür aber folgenschwere Unfälle ereigneten. Die Kreisfahrbahn weist relativ viele Unfälle auf, stellt aber bezüglich Unfallschwere kein Problem dar.

Die Untersuchungsobjekte weisen neben den zweistreifigen Einfahrten vor allem bei den untergeordneten Strassen einstreifige Einfahrten auf. Die Unfälle in den Einfahrten können in diese zwei Gruppen aufgeteilt werden. Die gleiche Aufteilung kann auch bei den Ausfahrten angewendet werden, da es neben den gewöhnlichen einstreifigen Ausfahrten bei den untersuchten Kreisellen auch zweistreifige Ausfahrten gibt. Die folgende Tabelle (Tab. 3.24) zeigt die durchschnittliche Anzahl Unfälle pro Jahr.

Tab. 3.24 Aufteilung der Unfälle nach ein- und zweistreifigen Ein- bzw. Ausfahrten

	Anz. betrachteter Ein- bzw. Ausfahrten	ϕ Anz. Unfälle / Jahr
Einstreifige Einfahrten	18	0.36
Zweistreifige Einfahrten	39	0.67
Einstreifige Ausfahrten	47	0.10
Zweistreifige Ausfahrten	9	0.72

Der Vergleich der Anzahl Unfälle pro Jahr bei ein- und zweistreifigen Einfahrten ergibt beinahe ein Verhältnis von 1:2. Mit der Erkenntnis, dass sich mit einer Verdoppelung der Fahrstreifenanzahl keine Verdoppelung der Verkehrsmenge in der Zufahrt erreichen lässt, muss erwartet werden, dass sich verkehrsbezogen mehr Unfälle bei zweistreifigen Einfahrten ereignen.

Deutliche Unterschiede ergeben sich dagegen zwischen ein- und zweistreifigen Ausfahrten. Die zweistreifigen Ausfahrten weisen siebenmal so viele Unfälle pro Jahr auf. Da die Datenstichprobe lediglich auf neun zweistreifigen Ausfahrten beruht, muss dieser Vergleich mit Vorsicht betrachtet werden.

3.4.4 Unfalltypen

Für die Auswertung der Unfalltypen werden die Unfälle entsprechend der Unfalltypennummer aus den Unfallprotokollen in die folgenden sechs Gruppen aufgeteilt (Tab. 3.25). Dabei muss beachtet werden, dass die Gruppe der Abbiegeunfälle unterschätzt wird, da bei der Protokollierung des Unfalls ein Abbiegeunfall auch als Unfall beim Fahrstreifenwechsel angesehen werden kann.

Tab. 3.25 Gruppen der Unfalltypen

	Unfalltyp-Nr.
Schleuder-/Selbstunfall	11 – 19
Auffahrunfall	41 – 49
Unfall beim Vorbeifahren oder FS-Wechsel	51 – 59
Abbiegeunfall	64
Einbiegeunfall	66, 72
Andere Unfälle	weitere

Die Verteilung der Unfälle auf die verschiedenen Gruppen ist in der folgenden Tabelle ersichtlich.

Tab. 3.26 Verteilung Unfalltypen

	Unfälle	
Schleuder-/Selbstunfall	42	(16.5 %)
Auffahrunfall	25	(9.9 %)
Unfall beim Vorbeifahren oder FS-Wechsel	90	(35.4 %)
Abbiegeunfall	14	(5.5 %)
Einbiegeunfall	77	(30.3 %)
Andere Unfälle	6	(2.4 %)
Total	254	(100 %)

Am häufigsten ereigneten sich bei den untersuchten zweistreifigen Kreiseln Unfälle beim Vorbeifahren oder Fahrstreifenwechsel sowie beim Einbiegen in den Kreisel. Bei den Einbiegeunfällen handelt es sich um die typischen Unfälle bei Kreiseln. Die Unfälle beim Vorbeifahren oder Fahrstreifenwechsel sind hingegen Unfälle, welche nur bei zweistreifigen Kreiseln auftreten können.

Für die Auswertung der Verunfallten und der Unfallschwere hinsichtlich der Unfalltypen, konnten wiederum zwei Kreisel (Nr. 13 und 14) nicht miteinbezogen werden (Tab. 3.27).

Tab. 3.27 Verteilung Unfalltypen (ohne Kreisel Nr. 13 und 14)

	Unfälle		Verunfallte		Unfallschwere
Schleuder-/Selbstunfall	37	(18.4 %)	9	(18.8 %)	24.3 %
Auffahrunfall	20	(10.0 %)	15	(31.3 %)	75.0 %
Unfall beim Vorbeifahren oder FS-Wechsel	73	(36.3 %)	5	(10.4 %)	6.9 %
Abbiegeunfall	2	(1.0 %)	0	(0.0 %)	0.0 %
Einbiegeunfall	63	(31.3 %)	17	(35.4 %)	26.2 %
Andere Unfälle	6	(3.0 %)	2	(4.1 %)	28.56 %
Total	201	(100 %)	48	(100 %)	23.9 %

Die Auswertung der Verteilung der Unfalltypen der Verunfallten und Unfallschwere verdeutlicht, dass Unfälle beim Vorbeifahren oder Fahrstreifenwechsel am häufigsten auftraten, diese Unfälle in der Regel aber nicht folgenschwer waren. Diese Tendenz zeigte sich auch bei den Einbiegeunfällen. Gegensätzlich verhält es sich bei den Auffahrunfällen. Diese Unfälle ereigneten sich selten aber es gibt oft verletzte Personen. Daraus resultiert die deutlich höchste Unfallschwere von 75 % bei den Auffahrunfällen. Schleuderunfälle traten nicht häufig auf, aber die Unfallschwere lag mit 24 % relativ hoch.

3.4.5 Unfallbeteiligte

Die Tab. 3.28 liefert einen Überblick über die an den Unfällen beteiligten Verkehrsteilnehmer. Für diese Zusammenstellung konnten die Kreisel 2, 3, 4, 5 und 6 nicht berücksichtigt werden, da keine Angaben zu den Beteiligten vorhanden waren. Insgesamt konnten 205 Unfälle mit Angaben zu den Beteiligten analysiert werden.

Tab. 3.28 Anzahl Unfälle nach Beteiligten

	Unfälle
PW	197
LW, LKW, Sattelschlepper	49
Motorrad	19
Velo, Kleinmotorrad	6
Fussgänger	1

Auffallend ist die grosse Zahl von Unfällen bei der ein Lieferwagen, ein Lastwagen oder ein Sattelschlepper beteiligt war. Bei 35 der 49 Unfällen handelt es sich um Unfälle beim Fahrtreifenwechsel (Unfalltypen 51, 52, 59). 30 der 49 Unfälle ereigneten sich auf der Kreisfahrbahn, 12 in der Einfahrt. Im weiteren zeigte sich, dass bei zwei Kreisel (Kreis Nr. 9 und Kreis Nr. 11) der Anteil von Unfällen mit Beteiligung von Liefer- und Lastwagen sowie Sattelschleppern mit 50 % bzw. 58 % sehr hoch lag.

Insgesamt ereignete sich nur ein Unfall mit einem Fussgänger. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass zweistreifige Kreisel meist ausserorts oder am Ortsrand zum Einsatz kommen und dadurch das Fussgängeraufkommen sehr gering ist. Dies trifft auch hauptsächlich bei der vorliegenden Untersuchung zu.

3.4.6 Unfallziffer

Die Verkehrsmengen an den einzelnen untersuchten Kreiseln unterscheiden sich zum Teil sehr stark. Um das Unfallgeschehen bei den verschiedenen Kreiseln miteinander zu vergleichen, wurden die Unfallziffern der einzelnen Kreisel berechnet und somit die Anzahl der Unfälle auf die Fahrleistung bezogen. Die Unfallziffern ermöglichten zusätzlich einen Vergleich mit dem Unfallgeschehen bei einstreifigen Kreiseln

Die Unfallziffer wird wie folgt berechnet:

$U_z = \frac{U \cdot 10^6}{\frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n DTV_i \cdot 365 \cdot T}$	U	= Anzahl Unfälle
	$\frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n DTV_i$	= Durchschnittlicher Täglicher Verkehr [Fz/Tag] (Summe der täglich in den Kreisel einfahrenden Fahrzeuge)
	T	= Beobachtungszeitraum [Jahre]

Abb. 3.21 Formel Unfallziffer

Die Unfallziffern für die einzelnen Kreisel sind in der Abb. 3.22 dargestellt.

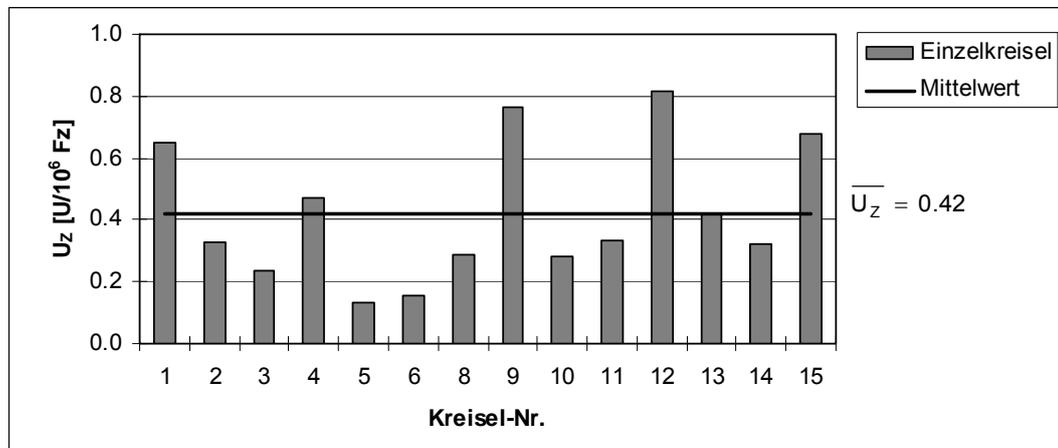


Abb. 3.22 Unfallziffern der einzelnen Kreisel

Für zweistreifige Kreisel ergibt sich eine durchschnittliche Unfallziffer von 0.42 Unfällen pro 10^6 Fahrzeuge. Der Vergleich der einzelnen Kreisel zeigt, dass die Unfallziffern der Untersuchungsobjekte stark streuen. Bei vier Kreiseln ist eine deutlich erhöhte Unfallziffer zu erkennen.

Die Auswertung des Unfallgeschehens, speziell der Kreisel mit erhöhter Unfallziffer, liefert einige mögliche negative Einflüsse der Kreiselgeometrie und des Betriebes auf die Verkehrssicherheit. Diese werden nachfolgend kurz erläutert:

- Bei den Kreiseln 12 und 15, welche sehr hohe Unfallziffern aufweisen, ereigneten sich auffallend viele Unfälle zwischen zwei Kreiselarmen mit einem Winkel zwischen 60° und 70° . Dadurch ergibt sich zwischen der Einfahrt und der folgenden Ausfahrt nur eine kleine Distanz auf welcher die Fahrstreifenwechsel sowohl der einfahrenden als auch der ausfahrenden Fahrzeuge erfolgen müssen.
- Das Unfallgeschehen bei den Kreiseln 9 und 11 ist stark geprägt durch Unfälle mit Lastwagen. Jeweils bei mehr als 50 % der Unfälle waren Lastwagen bzw. Sattelschlepper beteiligt. Es zeigt sich zudem, dass es sich bei den Unfällen mit Lastwagen bzw. Sattelschlepper häufig um Unfälle beim Vorbeifahren oder Fahrstreifenwechsel (Unfalltypengruppe 50) handelt. Dies zeigte sich bei Kreisel mit eher kleinen Aussendurchmessern, was einen Zusammenhang vermuten lässt.
- Bei Kreisel 1 fahren sehr viele Fahrzeuge bei der Zufahrt 1 in den Kreisel ein, wobei die Verkehrsmenge auf der Kreiselfahrbahn auf Höhe dieser Zufahrt sehr gering ist (vgl. Anhang III). Die Lenker können also häufig ohne anzuhalten in den Kreisel einfahren. Genau in dieser Zufahrt ereignete sich eine hohe Anzahl an Auffahrunfällen. Es wird vermutet, dass das Geschwindigkeitsniveau in der Zufahrt durch die oben beschriebene Verkehrssituation relativ hoch liegt. Dadurch ergibt sich ein erhöhtes Gefahrenpotential für einen Auffahrunfall, wenn ein Fahrzeug vor dem Kreisel abrupt abbremsen muss.

Allgemein wird davon ausgegangen, dass bei Knoten das Unfallgeschehen bei tiefen und hohen Verkehrsleistungen überproportional ansteigt. Das Konfliktpotential steigt einerseits bei kleinen Verkehrsmengen durch zum Teil stark überhöhte Geschwindigkeiten und andererseits bei Knoten in der Nähe der Leistungsgrenze durch sehr hohe Verkehrsdichten deutlich an. Um dies zu überprüfen, wurde eine Gegenüberstellung der Unfallziffern, welche bereits verkehrsleistungsbezogen sind, mit dem DTV vorgenommen (Abb. 3.23).

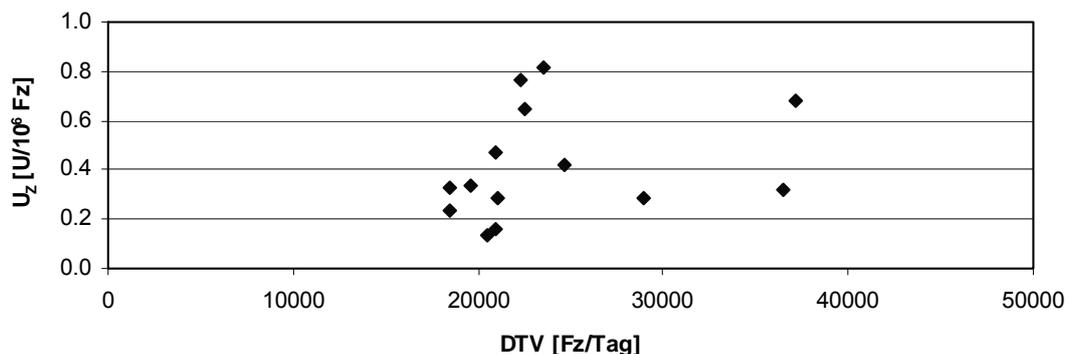


Abb. 3.23 Unfallziffer der einzelnen Kreisel in Abhängigkeit des DTV

Bei der Gegenüberstellung der Unfallziffern mit dem DTV ist kein klarer Zusammenhang erkennbar. Jedoch ist die Stichprobe mit zu wenigen Kreiseln mit mittleren bis hohen täglichen Verkehrsmengen zu unausgewogen um eine Aussage abzuleiten.

4 Bewertung der Ergebnisse

4.1 Leistungsfähigkeit der Einfahrten

4.1.1 Vergleich der Methoden zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit der Einfahrten

Die Leistungsfähigkeit von zweistreifigen Kreiseln wurde einerseits mit dem Regressions- und andererseits mit dem Zeitlückenverfahren bestimmt. Die Abb. 4.24 zeigt einen Vergleich der verschiedenen Kurven der Leistungsfähigkeit. Bei den Kurven nach Wu [21], Brilon [12] und Siegloch [18] wurden die in 3.2.1 abgebildeten mittleren Zeitlücken eingesetzt.

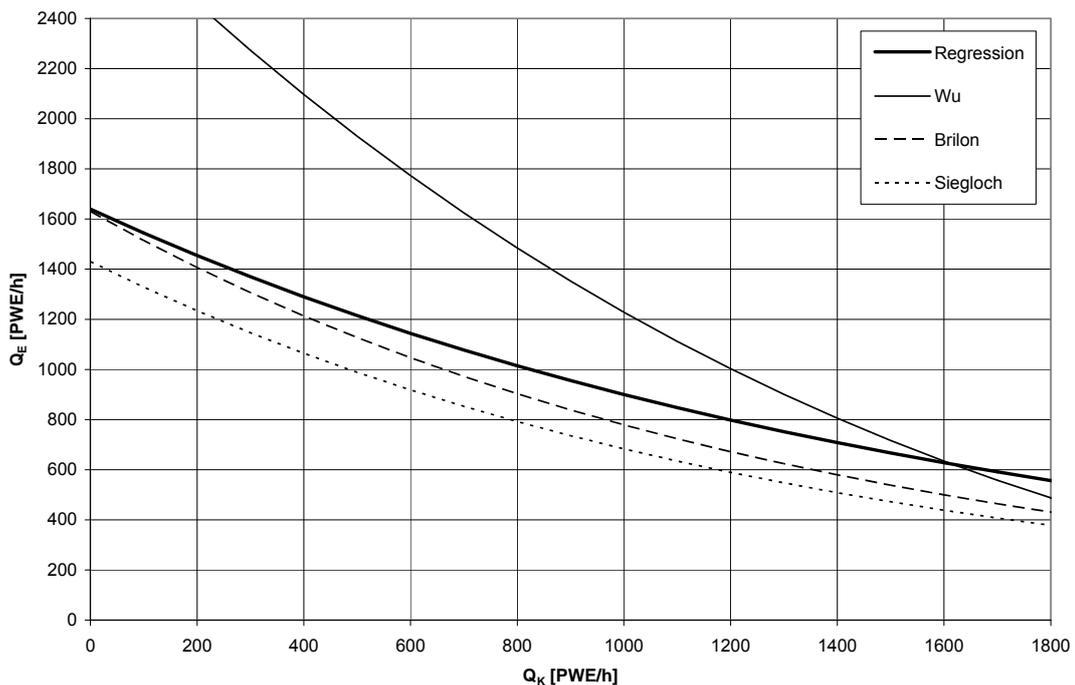


Abb. 4.24 Vergleich der Resultate Regression- und Zeitlückenverfahren

Grundsätzlich zeigt der Vergleich, dass mit Ausnahme der Wu-Kurve die Leistungsfähigkeiten nach dem Regressionsverfahren höher liegen als jene mit dem Zeitlückenverfahren, vor allem im Vergleich mit dem Verfahren nach Siegloch. Die Kurve nach Brilon mit den in der vorliegenden Untersuchung bestimmten Zeitlücken stimmt nur bei kleinen Verkehrsmengen auf der Kreisfahrbahn mit der Regressionskurve überein, währenddessen bei höheren Verkehrsmengen auf der Kreisfahrbahn ebenfalls Unterschiede bis 150 PWE/h vorhanden sind.

Die angesprochene Diskrepanz zwischen den zwei Berechnungsverfahren (Regressions- und Zeitlückenverfahren) wurden auch in anderweitigen Untersuchungen erkannt, ihre Ursachen sind bisher aber unbekannt. Wie weit diese Unterschiede auf die Auswertart (vgl. 2.3) oder auf andere Gründe zurückzuführen sind, wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht untersucht.

Zur Ergänzung der Norm wird empfohlen den Bemessungszusammenhang nach dem Regressionsverfahren zu verwenden. Einerseits wurden die bereits vorhandenen Bemessungszusammenhänge für die Kreiseltypen 1/1 sowie 2/1+ mit diesem Verfahren hergeleitet, andererseits basiert dieser Zusammenhang auf tatsächlich gezählten Verkehrsstärken bei einer relativ grossen Zahl von Untersuchungsobjekten.

4.1.2 Gegenüberstellung mit den Betriebsformen 1/1 und 2/1+

Neben den absoluten Werten für die Leistungsfähigkeit zweistreifiger Einfahrten interessiert der Vergleich mit Kreiseln anderer Betriebsformen, speziell der Vergleich mit einstreifigen Kreiseln.

Der Vergleich des in der vorliegenden Forschungsarbeit entwickelten Bemessungszusammenhangs für den Kreiseltyp 2/2 mit den Bemessungszusammenhängen für die Kreiseltypen 1/1 und 2/1+ aus der Schweizer Norm [1] ist in Abb. 4.25 ersichtlich.

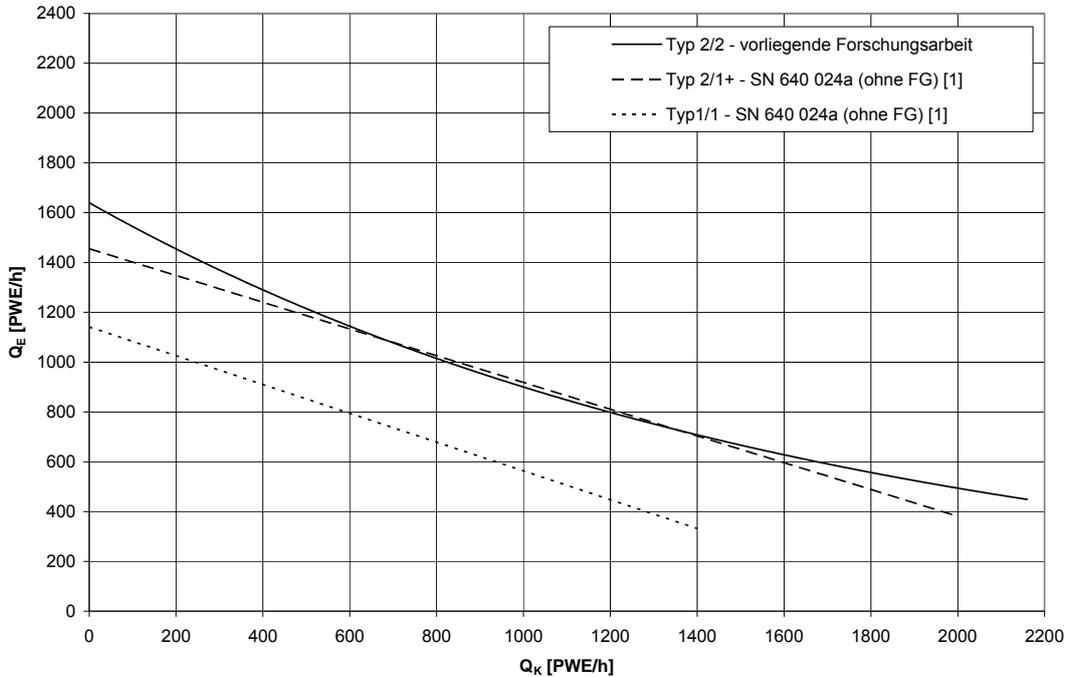


Abb. 4.25 Vergleich Bemessungszusammenhang Kreiseltyp 2/2 mit Typ 1/1 und 2/1+ gemäss SN 640 024a [1]

Die oben abgebildeten Kurven basieren auf den folgenden Formeln:

$$\text{Kreiseltyp 1/1:} \quad Q_E = 1141 - 0.578 \cdot Q_K \quad [1]$$

$$\text{Kreiseltyp 2/1+:} \quad Q_E = 1455 - 0.537 \cdot Q_K \quad [1]$$

$$\text{Kreiseltyp 2/2:} \quad Q_E = 1639.9e^{-0.0006 \cdot Q_K} \quad (\text{vorliegende Forschungsarbeit})$$

Bei der Kurve für zweistreifige Kreisel aus der vorliegenden Forschungsarbeit muss beachtet werden, dass die Kurve im Bereich von $Q_K > 1800$ PWE/h auf einer sehr kleinen Datenmenge beruht und deswegen mit Unsicherheiten behaftet ist.

Für eine verbesserte Vergleichbarkeit wird zusätzlich eine Gegenüberstellung des entwickelten Bemessungszusammenhangs für den Kreiseltyp 2/2 mit den in [2] erarbeiteten exponentiellen Bemessungszusammenhängen für Typ 2/1+ und Typ 1/1 angestellt (Abb. 4.26). Diese Bemessungszusammenhänge basieren im Gegensatz zu den linearen Zusammenhängen in der Norm auf allen Intervallen, d.h. es wurden auch die Intervalle mit Fussgängern berücksichtigt. Dabei wurden in [2] durchschnittlich 70 FG/h (Typ 1/1) bzw. 75 FG/h (Typ 2/1+) registriert.

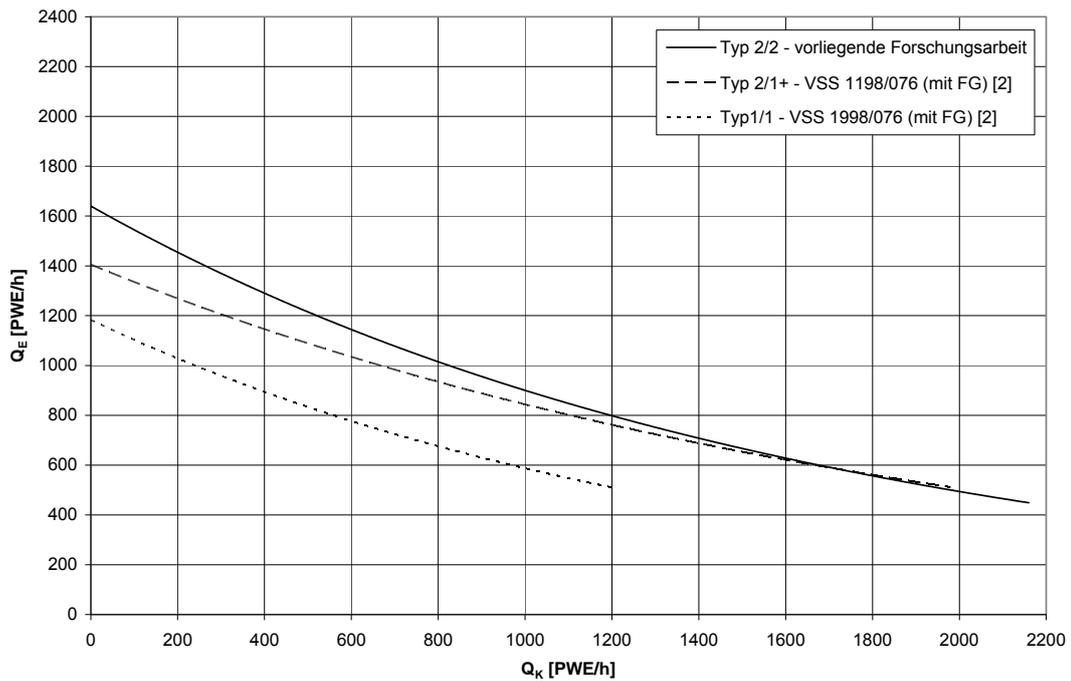


Abb. 4.26 Vergleich Bemessungszusammenhang Kreiseltyp 2/2 mit Typ 1/1 und 2/1+ (exponentiell, mit Fussgängern) [2]

Die oben abgebildeten Kurven basieren auf den folgenden Formeln:

$$\text{Kreiseltyp 1/1:} \quad Q_E = 1182.9 \cdot e^{-0.0007 \cdot Q_K} \quad [2]$$

$$\text{Kreiseltyp 2/1+:} \quad Q_E = 1405 \cdot e^{-0.0005 \cdot Q_K} \quad [2]$$

$$\text{Kreiseltyp 2/2:} \quad Q_E = 1639.9e^{-0.0006 \cdot Q_K} \quad (\text{vorliegende Forschungsarbeit})$$

Der Bemessungszusammenhang des Kreiseltyps 2/2 basiert auf Verkehrszuständen mit praktisch keinen Fussgängern. Für einen verbesserten Vergleich der drei Kreiseltypen zeigt die Abb. 4.27 die exponentiellen Kurven für Kreiseltyp 1/1 und 2/1+ ohne Fussgängerinfluss. Der Zusammenhang für den Kreiseltyp 2/1+ wurde basierend auf der Stichprobe der Forschungsarbeit [2] analog des Vorgehens bei Kreiseltyp 1/1 neu erarbeitet.

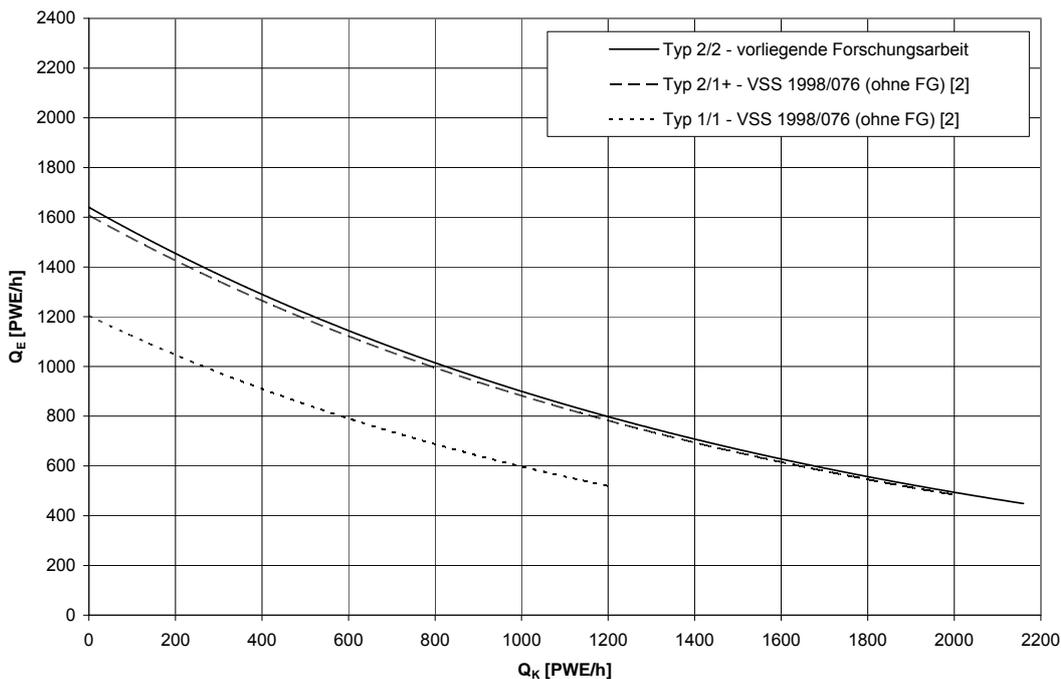


Abb. 4.27 Vergleich Bemessungszusammenhang Kreiseltyp 2/2 mit Typ 1/1 und 2/1+ (exponentiell, ohne Fussgänger) [2]

Die oben abgebildeten Kurven basieren auf den folgenden Formeln:

$$\text{Kreiseltyp 1/1:} \quad Q_E = 1203.7 \cdot e^{-0.0007 \cdot Q_K} \quad [2]$$

$$\text{Kreiseltyp 2/1+:} \quad Q_E = 1607.5 \cdot e^{-0.0006 \cdot Q_K} \quad [2], \text{ neu erstellt}$$

$$\text{Kreiseltyp 2/2:} \quad Q_E = 1639.9 \cdot e^{-0.0006 \cdot Q_K} \quad (\text{vorliegende Forschungsarbeit})$$

Die drei Abbildungen mit den Vergleichen der Leistungsfähigkeit verschiedener Kreiseltypen zeigen, dass sich für zweistreifige Kreisel 300 bis 400 PWE/h höhere Leistungsfähigkeiten der Einfahrten ergeben als für einstreifige Kreisel. Das bedeutet, dass die Leistungsfähigkeit um mehr als ein Drittel erhöht werden kann.

Die Abb. 4.25 bzw. Abb. 4.26 und speziell die Abb. 4.27 zeigen zudem, dass die Kurve der Kreiseltypen 2/1+ und 2/2 praktisch identisch sind. Das heisst, dass hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der zweistreifigen Einfahrt keine Unterschiede zu erkennen sind, ob die Kreisfahrbahn zweistreifig markiert ist oder ob nur eine überbreite Kreisfahrbahn vorhanden ist.

Bei der Betriebsform 2/1+ ergibt sich bei Zuständen mit Fussgängern (Abb. 4.26) im Gegensatz zu solchen ohne Fussgängern (Abb. 4.27) im Bereich von kleinen Verkehrsmengen auf der Kreisfahrbahn eine um 100 bis 200 PWE/h kleinere Leistungsfähigkeit der zweistreifigen Einfahrt. Der Zusammenhang für Kreiseltyp 2/1+ in [2] basiert im Wesentlichen auf Erhebungen an Kreisel im Innerortsbereich. Dort ist im Gegensatz zu den Einsatzbereichen des Kreiseltyps 2/2 (vorwiegend ausserorts) ein erhöhtes Fussgängeraufkommen charakteristisch.

Der reduzierende Einfluss der Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrten, wie er in der bestehenden Norm [1] angegeben ist, konnte bei der vorliegenden Untersuchung nicht verifiziert werden. Dazu waren die Fussgängermengen im Bereich der Untersuchungskreisel zu klein.

4.2 Leistungsfähigkeit der Ausfahrten

Für Ausfahrten aus zweistreifigen Kreiseln wurden mit ca. 1700 Fz/h für einstreifige Ausfahrten bzw. ca. 1850 Fz/h für zweistreifige Ausfahrten sehr hohe Leistungsfähigkeiten ermittelt. Der Wert für einstreifige Ausfahrten liegt im oberen Bereich der Sättigungsverkehrsmenge eines Fahrstreifens bei der Zufahrt eines LSA-gesteuerten Knotens von 1800 bis 2000 Fz/h. Durch den zweiten Fahrstreifen in der Ausfahrt ergaben sich ca. 150 Fz/h höher Leistungsfähigkeiten.

Auch Vergleiche mit den wenigen bisher bekannt gewordenen Empfehlungen zeigen, dass die ermittelten Ausfahrtsmengen hoch sind. In der Schweizer Norm ist für Ausfahrten von einstreifigen Kreiseln ein Richtwert von 1400 Fz/h angegeben. Eine Untersuchung von Brilon [7] zu einstreifigen Ausfahrten bei zweistreifigen Kreiseln ergab Kapazitäten der Ausfahrten zwischen 1500 und 1600 PWE/h.

Durch den zweiten Fahrstreifen im Kreis ergibt sich bei zweistreifigen Ausfahrten häufig eine Situation, die eine zügige Ausfahrt erlaubt. Zudem wirkt sich das auf der Kreisfahrbahn vorhandene gleichmässige Geschwindigkeitsniveau günstig auf die Leistungsfähigkeit der Ausfahrten aus.

Bei den ermittelten Leistungsfähigkeiten ist zu beachten, dass bei der vorliegenden Untersuchung keine Beeinflussung der ausfahrenden Fahrzeuge durch Fussgänger vorhanden war. Die Leistungsfähigkeit der Ausfahrt kann durch Fussgänger aber entscheidend reduziert werden. Aus diesem Grund müssen das Fussgängeraufkommen bei jedem Kreisel einzeln abgeklärt und die Auswirkungen abgeschätzt werden.

4.3 Unfallgeschehen

Allgemein geht man davon aus, dass zweistreifige Kreisel gegenüber einstreifigen Kreiseln ein höheres Unfallgeschehen aufweisen. Dafür sprechen die folgenden Tatsachen (vgl. Tab. 4.29, Tab. 4.30 und Tab. 4.31):

- Bei zweistreifigen Kreiseln ereignen sich viele Unfälle beim Vorbeifahren oder Fahrstreifenwechsel. Dieser Unfalltyp kommt bei einstreifigen Kreiseln nicht vor.
- Es gibt keine offensichtlichen Anzeichen, dass sich gewisse Unfalltypen bei zweistreifigen Kreiseln weniger oft ereignen als bei einstreifigen.

Tab. 4.29 Vergleich der absoluten Unfallkenngrössen verschiedener Kreiselbetriebsformen

	ϕ Anz. Unfälle pro Jahr	ϕ Anz. Verunfallte pro Jahr
Kreiseltyp 2/2 (vorliegende FA)	3.79	0.95
Kreiseltyp 2/1+ [15]	3.82	0.84
Kreiseltyp 1/1 [14]	2.48	0.68

Tab. 4.30 Vergleich der Verteilung der Unfallorte verschiedener Kreiselbetriebsformen

	Unfallort		
	Einfahrt	Ausfahrt	Kreis
Kreiseltyp 2/2 (vorliegende FA)	45 %	14 %	40 %
Kreiseltyp 2/1+ [15]	43 %	21 %	36 %
Kreiseltyp 1/1 [14]	77 %	12 %	11 %

Tab. 4.31 Vergleich der Verteilung der Unfalltypen verschiedener Kreiselbetriebsformen

	Unfalltyp			
	Selbstunfall	Auffahrunfall	Fahrestreifen- wechsel-Unfall	Unfall b. Rich- tungswechsel
Kreiseltyp 2/2 (vorliegende FA)	18 %	10 %	36 %	32 %
Kreiseltyp 2/1+ [15]	15 %	18 %	32 %	31 %
Kreiseltyp 1/1 [14]	22 %	10 %	-	57 %

Um die verschiedenen Betriebsformen aber wirklich miteinander vergleichen zu können, müssen die relativen Unfallkenngrossen betrachtet werden, d.h. die Fahrleistung muss berücksichtigt werden.

Aus einigen Untersuchungen sind einzelne Kenngrössen bekannt, welche in der Tab. 4.32 mit der Unfallziffer der zweistreifigen Kreisel aus der vorliegenden Untersuchung verglichen werden.

Tab. 4.32 Vergleich der Unfallziffern verschiedener Kreiselbetriebsformen

Quelle	Kreiseltyp 1/1	Kreiseltyp 2/1+	Kreiseltyp 2/2
Vorliegende Forschungsarbeit			0.42 U/10 ⁶ Fz
Lindenmann [15]		0.43 U/10 ⁶ Fz	
Bühlmann [14]	0.44 U/10 ⁶ Fz		
Brilon [7]			0.63 U/10 ⁶ Fz
Matthews [17]	0.54 U/10 ⁶ Fz		

Bei der Unfallziffer für den Kreiseltyp 1/1 aus der Forschungsarbeit von Bühlmann und Spacek [14] muss berücksichtigt werden, dass dort speziell unfallauffällige Kreisel gesucht wurden. Es muss deshalb davon ausgegangen werden, dass die Unfallziffer das wirkliche Unfallgeschehen im Durchschnitt etwas überschätzt.

Matthews [17] unterscheidet in seiner Untersuchung nicht nach Kreiselbetriebsform sondern nach Anzahl Kreiselarmer. Als Vergleichswert wurde hier die Unfallziffer für vierarmige Kreisel eingesetzt. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei der überwiegenden Mehrheit um einstreifige Kreisel handelt.

Die durchschnittliche Unfallziffer zweistreifiger markierter Kreisel aus der deutschen Untersuchung von Brilon, Bäumer [7] liegt höher als die Unfallziffer aus der vorliegenden Forschungsarbeit. Hier gilt es zu beachten, dass die Aussendurchmesser der Kreisel aus der deutschen Untersuchung mit 45 – 56 m deutlich grösser sind als jene der Schweizer Untersuchungsobjekte.

Die Vergleichswerte in Tab. 4.32 verdeutlichen, dass zweistreifige Kreisel im Vergleich mit anderen Kreiseltypen ein gleich hohes Sicherheitsniveau aufweisen. Es geschehen zwar gesamthaft mehr Unfälle, speziell fallen hier die Unfälle auf der Kreisfahrbahn auf, doch fahren auch deutlich mehr Fahrzeuge in den Kreisel ein, so dass vergleichbare Unfallziffern resultieren. Es zeigt sich aber auch, dass die Unfallziffern der einzelnen Kreisel stark streuen.

Die Untersuchung des Unfallgeschehens zeigt aber auch, dass zweistreifige Ausfahrten bei zweistreifigen Kreiseln negative Auswirkungen auf die Sicherheit haben. Im Vergleich mit den einstreifigen Ausfahrten bei den Untersuchungsobjekten geschahen in den zweistreifigen Ausfahrten deutlich mehr Unfälle. Trotz der geringen Datenmenge lässt sich hier sagen, dass zweistreifige Ausfahrten aus Sicherheitsgründen vermieden werden sollten. Dies umso mehr als der zweite Fahrestreifen in der Ausfahrt keine entscheidende Erhöhung der Leistungsfähigkeit bringt.

Ein Zusammenhang zwischen dem Unfallgeschehen und der vorhandenen Verkehrsmengen ist aus der vorhandenen Stichprobe praktisch nicht ersichtlich (vgl. Abb. 3.23). Damit lassen sich keine Einsatzkriterien hinsichtlich Verkehrsmengen (DTV) von zweistreifigen Kreiseln ableiten.

5 Erkenntnisse und Folgerungen

5.1 Vorbemerkungen

Im Folgenden werden Vorbemerkungen allgemeiner Art aus der Bearbeitung des Forschungsauftrages angeführt, soweit sie die Aussagekraft und Bedeutung der Untersuchungsergebnisse betreffen.

5.1.1 Auswahl der Untersuchungsobjekte

Einerseits aufgrund der erwartungsgemäss sehr arbeitsaufwendigen Videoauswertungen zum Zeitlückenverhalten der Fahrzeuglenker beim Einfahren in einen Kreisel, musste die Anzahl der Untersuchungsobjekte begrenzt werden. Andererseits hat sich die Randbedingung „Auslastung“ bei der Suche geeigneter Standorte zur Videoerfassung des Verkehrsablaufes als mitentscheidende Schranke erwiesen. Schliesslich konnten aus Gründen der Untersuchungsmethodik nur Kreiseleinfahrten in die Untersuchung der Leistungsfähigkeit miteinbezogen werden, welche zu Verkehrsspitzenzeiten genügend hohe Belastungen aufwiesen, sodass die Sättigungsbedingung zumindest zeitweise erfüllt werden.

Diese Bedingungen liessen die mögliche Anzahl Untersuchungsobjekte so stark eingrenzen, dass noch 15 über die ganze Schweiz verteilte Kreisel mit insgesamt 17 erfass- und auswertbaren Einfahrten für die Untersuchung einbezogen werden konnten.

Die Stichprobe darf aufgrund von Erfahrungen früherer Untersuchungen und auch im Vergleich mit ähnlichen ausländischen Untersuchungen, als genügend aussagekräftig für die Formulierung eines allgemeingültigen Bemessungszusammenhangs beurteilt werden. Im Vergleich zu den Stichproben früherer Messungen zur Leistungsfähigkeit einstreifiger Kreisel ist sie deutlich grösser.

5.1.2 Erfassung des Grenzbereichs der Leistungsfähigkeit der Einfahrten

Zur empirischen Bestimmung der Grenzen der Leistungsfähigkeit von zweistreifigen Einfahrten bei zweistreifigen Kreiseln werden heute grundsätzlich sowohl das Regressionsverfahren (Verkehrsmengen) als auch das Zeitlückenverfahren (Grenz- und Folgezeitlücken) zur Formulierung des Bemessungszusammenhangs verwendet.

Die Bestimmung des Bemessungszusammenhangs basiert definitionsgemäss bei beiden Verfahren auf dem Zustand des gesättigten Verkehrsablaufes, d.h. Fahrzeuge die in die Kreisfahrbahn einfahren wollen, müssen zumindest kurz warten und die dahinter folgenden Fahrzeuge müssen schrittweise aufrücken. Kreisel haben bekannterweise eine hohe Leistungsfähigkeit und können deshalb hohe Verkehrsmengen abarbeiten. Die Definition des Sättigungszustandes für empirische Untersuchungen wie der vorliegenden erwies sich – wie auch anderweitige Untersuchungen im Ausland zeigten – als nicht einfach. Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung verwendeten Festlegungen zur Definition des Sättigungszustandes (vgl. 2.3.2) beschreibt zwar einen Zustand des Verkehrsablaufes im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit einer Kreiseleinfahrt, vermag aber die effektive Leistungsgrenze kaum anzugeben. Wollte man die Leistungsgrenze exakt erfassen, so fallen bei den empirischen Beobachtungen nur ganz vereinzelte Zeitintervalle an. Für diese auf statistischen Auswertungen basierenden Zusammenhänge der maximal möglichen einfahrenden Verkehrsteilnehmer in Funktion der Verkehrsmenge auf der Kreisfahrbahn wurden hier jene Zeitintervalle des Verkehrsablaufes verwendet, die der empirischen festgelegten Definition der Sättigung entsprachen.

Daraus ergibt sich die grundsätzliche Erkenntnis, dass der hergeleitete Bemessungszusammenhang der Einfahrten zwar die Grenzbereiche der Leistungsfähigkeit zutreffend

beschreibt, nicht aber explizit deren Grenze. Es zeigt sich, dass sich die Leistungsgrenze je nach Situation höher oder tiefer als der Bemessungszusammenhang liegt.

5.1.3 Wahl des Bemessungszusammenhanges

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung geht hervor, dass zwischen dem Bemessungszusammenhang aufgrund der Regressionsanalysen der Verkehrsmengen zwischen Einfahrt und Kreisfahrbahn und dem Bemessungszusammenhang nach Zeitlückentheorie beträchtliche Unterschiede vorliegen. So zeigten sich beim Bemessungszusammenhang nach Zeitlückenverfahren um 150 PWE/h tiefere Leistungsfähigkeiten der zweistreifigen Kreiseleinfahrten. Dies entspricht immerhin mehr als einer Stufe der Verkehrsqualität. Diese grossen Unterschiede zeigen sich bei der Verwendung der klassischen Siegloch-Formel und noch deutlicher bei der rein theoretischen Wu-Formel.

Die Gründe und Ursachen für die deutlichen Unterschiede konnten im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nur teilweise erklärt werden. Immerhin lässt sich feststellen, dass die hier gefundenen Grenz- und Folgezeitlücken etwas kleiner ausfielen als jene an zweistreifigen Kreiseln in Deutschland [7]. Ein Grund dafür dürfte der Umstand sein, dass bei den Untersuchungen in Deutschland im Durchschnitt grössere Kreiselaussendurchmesser vorlagen, sich somit eher grössere Geschwindigkeiten auf der Kreisfahrbahn einstellen und damit auch grössere Grenz- und Folgezeiten resultieren. Der aufgrund des Zeitlückenverfahren formulierte deutsche Bemessungszusammenhang zeigt im Vergleich mit dem schweizerischen im Rahmen der vorliegenden Untersuchung gefundenen Regressionszusammenhang (Verkehrsmengen) tiefere Werte der Leistungsfähigkeit der Einfahrten, dies umso deutlicher je höher die Verkehrsbelastung auf der Kreisfahrbahn ist.

Allgemein wird dem Regressionsverfahren grössere Aussagekraft beigemessen und sollte deshalb bei der Normung bevorzugt werden.

5.1.4 Form des Bemessungszusammenhangs

Sowohl in verschiedenen ausländischen als auch schweizerischen Untersuchungen wurden bisher lineare und exponentielle Bemessungszusammenhänge angewandt. Die bestehende Schweizer Norm „Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit; Knoten mit Kreisverkehr“ [1] beinhaltet für einstreifige Kreisel (Typ 1/1) sowie für einstreifig markierte Kreisel mit einer überbreiten Kreisfahrbahn (Typ 2/1+) einen linearen Bemessungszusammenhang.

Die Regressionsanalyse in der vorliegenden Untersuchung ergab, dass sowohl bei der Mehrheit der Einzelkreisel als auch bei deren Zusammenfassung mit dem exponentiellen Ansatz eine bessere Modellgüte erreicht wird.

Es erscheint deshalb angezeigt bei der Normung, dem exponentiellen Bemessungszusammenhang für zweistreifige Kreisel (Typ 2/2) den Vorrang zu geben. Wie aus dem Forschungsauftrag „Leistungsfähigkeit hochbelasteter Kreisel „Grundlagen“ [2] für einstreifige Kreisel mit überbreiter Fahrbahn und zweistreifigen Einfahrten (Typ 2/1+) hervorging, weisst auch bei diesem Bemessungszusammenhang der exponentielle Ansatz gegenüber dem linearen Ansatz eine leicht bessere Güte (Regressionskoeffizient) auf. Schliesslich ergab die Regressionsanalyse anhand der Verkehrsmenge in der Einfahrt und der Verkehrsmenge auf der Kreisfahrbahn auch für einstreifige Kreisel in der früheren Untersuchung [2] ebenfalls für den exponentiellen Ansatz eine bessere Güte für den Bemessungszusammenhang. Damit ergibt sich eine einheitliche Formulierung aller drei Bemessungszusammenhänge mit dem exponentiellen Ansatz.

5.1.5 Bestimmung des Sicherheitsniveaus

Auch die Untersuchung des Unfallgeschehens und die Bestimmung des Sicherheitsniveaus musste mit einer begrenzten Anzahl Kreiseln durchgeführt werden. Für diesen Teil der Untersuchung standen die gleichen Kreiseln zur Verfügung wie für die Analyse der Leistungsfähigkeit. Zudem war ein Kreiseln zu kurz in Betrieb, so dass keine repräsentativen Daten über das Unfallgeschehen vorlagen. So umfasste die Stichprobe für die Auswertung des Unfallgeschehens insgesamt 14 Kreiseln. Bei diesen wurde das Unfallgeschehen mindestens von drei, üblicherweise von fünf Jahren in die Auswertung miteinbezogen. Trotz der geringen Stichprobengrösse konnte bezüglich Aussenradius und Gestaltung der Kreiseln eine relativ grosse Breite abgedeckt werden.

Die Bestimmung des Sicherheitsniveaus wurde durchgeführt, um eine Grundlage zu schaffen, mit der das Unfallgeschehen ein- und zweistreifiger Kreiseln miteinander verglichen werden kann. Um diesen Vergleich durchführen zu können, wurden nicht nur die absoluten Unfallzahlen bei den Untersuchungsobjekten betrachtet, sondern mit den jeweiligen Verkehrsleistungen relative Unfallkenngrössen berechnet.

Mit den durchschnittlichen Unfallkennzahlen für zweistreifige Kreiseln lassen sich Vergleiche des Sicherheitsniveaus von bestehenden Anlagen durchführen.

5.2 Leistungsfähigkeit

5.2.1 Leistungsfähigkeit der Einfahrten

Es wurde bisher grundsätzlich angenommen, und durch ausländische Untersuchungen erhärtet, dass zweistreifige Kreiseln, d.h. Kreiseln mit zweistreifig markierter Kreiselfahrbahn und zweistreifigen Einfahrten pro Zeiteinheit grössere Verkehrsmengen verarbeiten können als einstreifige Kreiseln. Es wurde allgemein davon ausgegangen, dass die Leistungsfähigkeit zweistreifiger Einfahrten ca. 30 % höher liegt als bei einstreifiger Ausbildung. Inwieweit sich dies in Abhängigkeit der Fahrstreifenauslastung der zweistreifigen Zufahrten zeigt, sollte im Rahmen dieser Untersuchung überprüft werden. Zur Beantwortung dieser offenen Frage wurde einerseits der Zusammenhang zwischen der Verhältnisse in der zweistreifigen Einfahrt in Abhängigkeit zur Verkehrsstärke auf der zweistreifigen Kreiselfahrbahn ermittelt und entsprechendem Zusammenhang einstreifiger Kreiseln mit überbreiten Kreiselfahrbahnen und zweistreifiger Einfahrten [2] gegenübergestellt. Andererseits wurden im Rahmen dieser Forschungsarbeit die Einflüsse der Fahrstreifenauslastung zweistreifiger Einfahrten sowie die Einflüsse einer Fahrstreifensignalisation analysiert um allfällige Veränderungen der Leistungsfähigkeit zu erkennen.

Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich des in der vorliegenden Forschungsarbeit erarbeiteten Bemessungszusammenhanges für den Kreiseltyp 2/2 mit den Zusammenhängen (exponentieller Ansatz) für die Kreiseltypen 2/1+ und 1/1 nach [2].

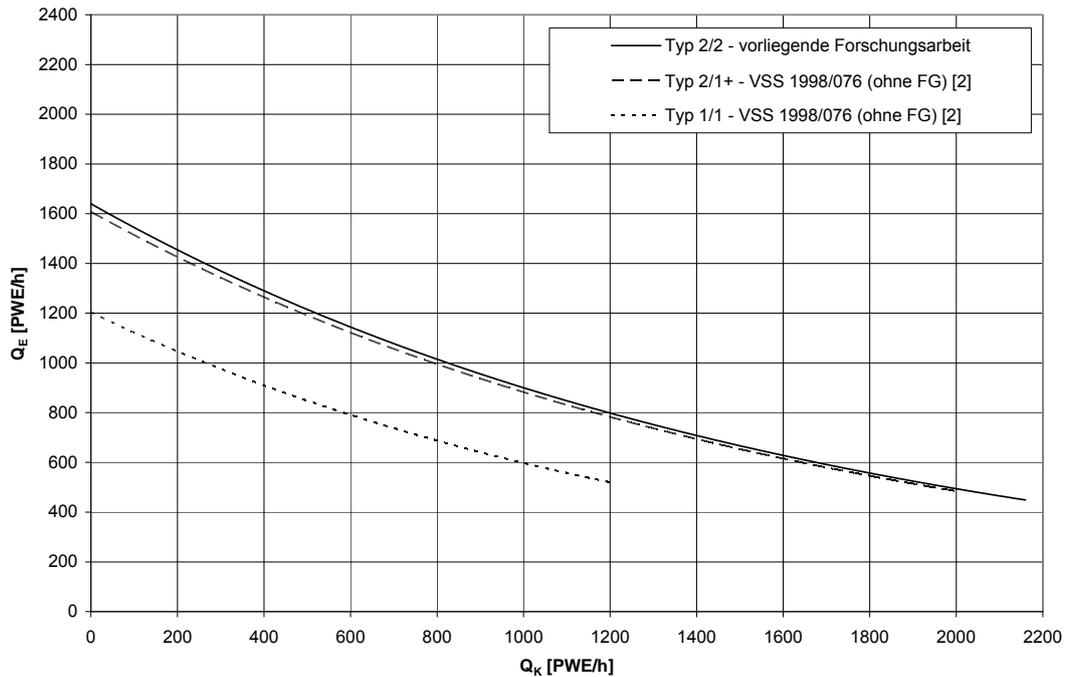


Abb. 5.28 Leistungsfähigkeit ein- und zweistreifiger Kreisel bei ein- und zweistreifigen Einfahrten

Zweistreifige Einfahrten zweistreifiger Kreisel haben bei kleineren Verkehrsmengen auf der Kreisfahrbahn im Mittel eine um 25 % höhere und bei mittleren und höheren Verkehrsbelastungen auf der Kreisfahrbahn eine um 30 % höhere Leistungsfähigkeit. Bei mittleren und höheren Verkehrsbelastungen auf der Kreisfahrbahn entspricht dies absolut etwa 300 PWE/h. Nicht erwartungsgemäss, jedoch vorteilhaft erweist sich dabei, dass auch bei hoher Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn deutlich mehr Fahrzeuge einfahren können als bei einstreifigen Kreiseln.

Zwischen den Betriebsformen 2/1+ und 2/2 bestehen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der Einfahrten praktisch keine Unterschiede. D.h. es sind keine Unterschiede zu erkennen, ob eine überbreite einstreifige Kreisfahrbahn oder eine mit zwei Fahrstreifen markierte Kreisfahrbahn vorhanden ist. Die Leistungsfähigkeit der beiden Betriebsformen kann ohne Berücksichtigung von Fussgängern als ungefähr identisch betrachtet werden. Es ist aber zu beachten, dass die Betriebsform 2/1+ häufig im Innerortsbereich angewandt wird, wo ein deutliches Fussgängeraufkommen zu erwarten ist. Darum ist von Fall zu Fall zu entscheiden ob bei der Betriebsform 2/1+, der oben angegebene Bemessungszusammenhang für 2/2 bzw. 2/1+ ohne Fussgänger oder der unter 4.1.2 angegebene Bemessungszusammenhang für Typ 2/1+ mit Fussgängereinfluss für die Dimensionierung heranzuziehen ist.

5.2.2 Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrten

Während die vorliegende Untersuchung nur ein kleiner Einfluss der Grösse des Aussendurchmessers des Kreisels zeigt, geht ein deutlicher Einfluss der Fahrstreifenbelastungen bei den beiden Fahrstreifen der Einfahrt auf die Gesamtleistungsfähigkeit der Einfahrt hervor. Die folgende Abbildung zeigt nochmals die Leistungsfähigkeit der zweistreifigen Einfahrten bei unterschiedlichen Fahrstreifenbelegungen der beiden Fahrstreifen in der Einfahrt.

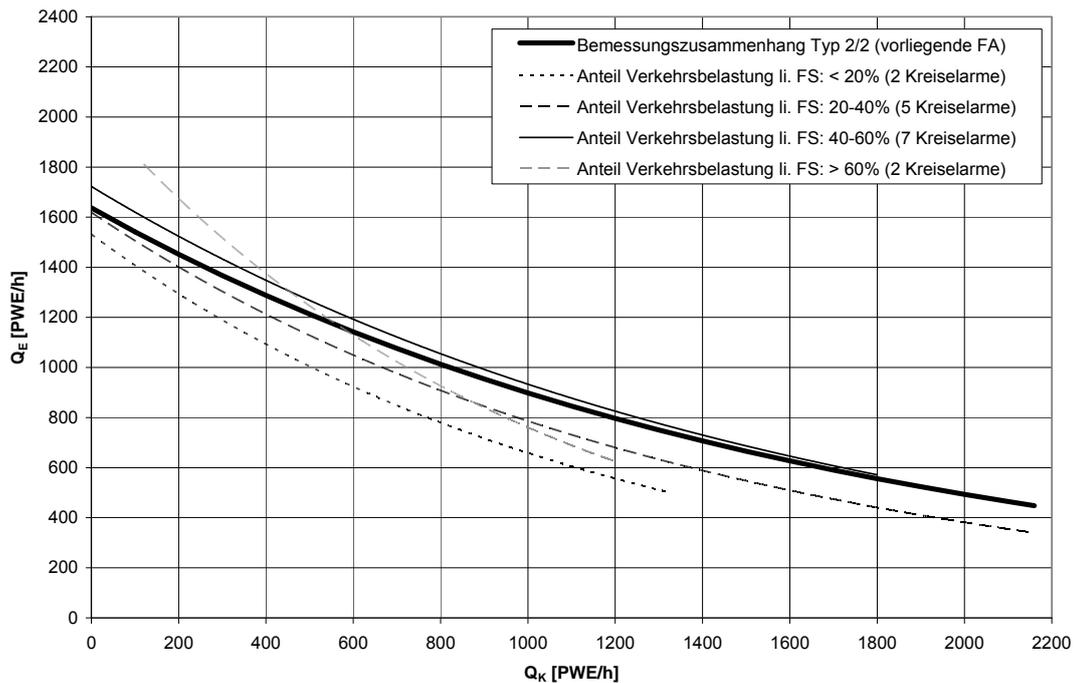


Abb. 5.29 Einfluss Fahrstreifenbelastung auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrten

Die Abbildung macht deutlich, dass bei gleichmässiger Auslastung der beiden Fahrstreifen der Einfahrten eine um ca. 200 bis 400 PWE/h höhere Leistungsfähigkeit der Einfahrt erreicht werden kann. Im Bereich von kleinen Verkehrsmengen ($Q_k < 400$ PWE/h) auf der Kreisfahrbahn ergeben sich geringere und uneinheitliche Unterschiede, welche z.T. auf die geringe Datenmenge in diesem Bereich zurückzuführen ist.

Wie schon bei der Betriebsform 2/1+ in [2] zeigt die Untersuchung klar, dass zur Erreichung der mit zweistreifiger Ausbildung des Kreisels angestrebten höheren Leistungsfähigkeit eine gleichmässige Auslastung des linken und rechten Fahrstreifens in der Einfahrt vorausgesetzt ist. Dies wird durch die geringen Unterschiede zwischen dem ermittelten Bemessungszusammenhang Typ 2/2 und der Regressionskurve der Gruppe der Kreiseinfahrten mit gleichmässiger Verteilung der Verkehrsmengen in der Einfahrt deutlich (Abb. 5.29). Es zeigt sich zudem, dass für Einfahrten mit schlechter Verteilung der Verkehrsmengen deutlich tiefere Werte der Leistungsfähigkeit resultieren können.

5.2.3 Leistungsfähigkeit der Ausfahrten

Die Untersuchung der Kreiselausfahrten liefert folgende Richtwerte für die Leistungsfähigkeit für einstreifige und zweistreifige Ausfahrten aus zweistreifigen Kreiseln:

Einstreifige Ausfahrten:	1700 Fz/h
Zweistreifige Ausfahrten:	1850 Fz/h

Es zeigt sich, dass bei Ausfahrten aus zweistreifigen Kreiseln sehr hohe Leistungsfähigkeiten erreicht werden können. Die durchschnittlich erreichte Verkehrsmenge bei einstreifigen Kreiseln lag mit 1700 Fz/h im oberen Bereich der Sättigungsverkehrsmenge eines Fahrstreifens von 1800 bis 2000 Fz/h. Dies lässt sich einerseits mit dem homogenen Geschwindigkeitsniveau im Kreisell und andererseits mit der Ausfahrtsgeometrie erklären, welche bei zweistreifigen Kreiseln oft ein flüssiges Ausfahren ermöglicht.

Bei diesen Richtwerten ist zu beachten, dass der Einfluss der Fussgänger nicht enthalten ist.

5.3 Verkehrssicherheit zweistreifiger Kreisel

5.3.1 Allgemeines

Entgegen bisheriger Vermutungen führte die vorliegende Untersuchung zum Unfallgeschehen zweistreifiger Kreisel zur Erkenntnis, dass das Sicherheitsniveau zweistreifiger Kreisel etwa gleich ist wie jenes einstreifiger Kreisel. Zwar ereignen sich an zweistreifigen Kreiseln absolut mehr Unfälle als an einstreifigen Kreiseln, die Unfallziffer, d.h. die Zahl der Unfälle bezogen auf die im Kreisel erbrachte Verkehrsleistung (Summe aller einfahrenden Fahrzeuge), ist beinahe gleich. Die teilweise in der Praxis aufgrund der Unsicherheiten bzgl. vorhandenen Sicherheitsniveaus geäußerte Zurückhaltung hinsichtlich der Anwendung zweistreifiger Kreisel lässt sich aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse weitgehend entkräften.

5.3.2 Absolute Unfallkenngrößen

Die Auswertungen des Unfallgeschehens an zweistreifigen Kreiseln bestätigt, dass Kreisel ein hohes Sicherheitsniveau, insbesondere bezüglich Unfallschwere aufweisen. Obwohl die absoluten Unfallzahlen, d.h. die Zahl der Unfälle und die Zahl der Verunfallten bei den einzelnen Kreiseln erheblich unterschiedlich ist, sind die durchschnittlich pro Jahr errechneten Werte mit rund 3.8 Unfällen pro Jahr und 1 Verunfallten pro Jahr im Vergleich mit Einmündungen und Kreuzungen sehr gering. Im Vergleich zu einstreifigen Kreiseln liegen die Durchschnittswerte zwar um 28 % bei der Zahl der Unfälle und um 34 % bei den Verunfallten höher, dabei werden aber auch deutlich grössere Verkehrsleistungen auf dem zweistreifigen Kreiseln verarbeitet.

Die vorliegende Auswertung der Unfälle und Verunfallten nach Unfalltypen lässt erkennen, welche besonderen Probleme auch bei einem hohen Sicherheitsniveau bei zweistreifigen Kreiseln vorliegen resp. wo noch Verbesserungspotential bzgl. Verkehrssicherheit vorhanden ist.

Bei den folgenden Interpretationen zu den Erkenntnissen der vertieften Unfallauswertung ist der Umstand zu beachten, dass die Zuordnung der Unfälle zu den Unfalltypen nach Bfs-Instruktionen [24] mit Unklarheiten und Ungenauigkeiten verbunden ist, weil diese nicht spezifisch auf Kreisel ausgelegt sind.

Rund die Hälfte der Unfälle und etwas mehr als die Hälfte der Verunfallten werden bei den Kreiseleinfahrten und in den Einfahrbereichen verzeichnet. Dabei fallen gegenüber dem erwartungsgemäss häufigen Unfällen mit Fahrstreifen- oder Richtungswechsel (rund 35 % Unfälle, rund 22 % Verunfallte) die Auffahrunfälle (10 %) mit über 30 % der Verunfallten auf. Die Ursachen für diese Auffahrunfälle mit hoher Unfallschwere konnten im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht weiter analysiert werden.

Als weitere Auffälligkeit im Unfallgeschehen wird festgestellt, dass bei rund 15 % der Unfälle in den Ausfahrbereichen rund 23 % der Verunfallten zu verzeichnen sind. Auch hier ergibt sich eine erhöhte Unfallschwere. Dabei handelt es sich, wie die Unfallbilder der einzelnen Kreisel zeigen, häufig um Schleuder-/Selbstunfälle. Hier lässt sich vermuten, dass beim Verlassen des Kreisels auch aufgrund flüssiger Trassierung und allenfalls grosser Querschnittsbreiten rasch beschleunigt und damit zu früh hohe Fahrzeuggeschwindigkeiten erreicht werden.

In diesem Zusammenhang kann aber aufgrund der absoluten Unfallzahlen bereits schlüssig bestätigt werden, dass zweistreifige Ausfahrten wegen der gegenüber einstreifiger Ausfahrten rund sieben mal grössere Unfallhäufigkeit vermieden werden müssen.

5.3.3 Relative Unfallkenngrößen

Wird die Zahl der Unfälle in Relation zur auf dem Kreisel erbrachten Verkehrsleistung gesetzt, also die Unfallziffer als relative Unfallkenngrösse betrachtet, weisen die hier untersuchten Kreisel mit einem Durchschnitt von $U_z = 0.42 \text{ U}/10^6 \text{ Fz}$ im Vergleich zu anderen, nicht lichtsignalgesteuerten Knoten ($U_z = 0.6 \text{ U}/10^6 \text{ Fz}$ [17]) ein höheres Sicherheitsniveau auf. Die Unfallauswertung zeigt zudem, dass sich bei den zweistreifigen Kreiseln nur wenige Unfälle mit Verunfallten ereignen. Aus diesem Grund wäre bei einem Vergleich der Verunfalltenziffern verschiedener Knotentypen ein noch deutlicheres Resultat zu erwarten. Dazu liegen aber zurzeit noch keine Vergleichswerte vor.

Diese Erkenntnisse sind naturgemäss mit dem deutlich kleineren Geschwindigkeitsniveau des Verkehrsablaufes und der geringeren Anzahl Konfliktpunkte beim Kreisel begründet. Dies zeigt sich offensichtlich auch bei zweistreifigen Kreiseln, wenn die Aussendurchmesser relativ klein bleiben. Hinsichtlich Unfallziffer ergibt eine zeitlich parallel aber unabhängige Untersuchung [17] vergleichbare Ergebnisse für Kreisel. Die im Jahre 2004 abgeschlossene Untersuchung von Bäumer und Brilon [7] weist Unfallraten¹ von $U_R = 0.63 \text{ U}/10^6 \text{ Fz}$, also etwas höhere Werte aus. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei der deutschen Untersuchung zweistreifige Kreisel mit im Durchschnitt grösseren Aussendurchmesser im Vergleich mit den hier untersuchten Kreiseln miteinbezogen wurden. Eine vertiefte Analyse dazu wurde aber nicht durchgeführt.

Die folgende Tabelle zeigt Vergleichswerte von Unfallziffern für Kreisel nach unterschiedlichen Betriebsformen.

Tab. 5.33 Vergleich der Unfallziffern verschiedener Kreiselbetriebsformen

Quelle	Kreiseltyp 1/1	Kreiseltyp 2/1+	Kreiseltyp 2/2
Vorliegende Forschungsarbeit			$0.42 \text{ U}/10^6 \text{ Fz}$
Lindenmann [15]		$0.43 \text{ U}/10^6 \text{ Fz}$	
Bühlmann [14]	$0.44 \text{ U}/10^6 \text{ Fz}$		
Brilon [7]			$0.63 \text{ U}/10^6 \text{ Fz}$
Matthews [17]		$0.54 \text{ U}/10^6 \text{ Fz}$	

Entgegen der bisherigen Auffassung zeigt sich bei zweistreifigen Kreiseln gemessen an den relativen Unfallkenngrößen kein schlechteres Sicherheitsniveau. Die Unfallziffern der drei Betriebsformen sind etwa gleich. Obwohl die durchschnittliche Anzahl der Unfälle und der Verunfallten bei zweistreifigen Kreiseln im Vergleich zu einstreifigen Kreiseln höher ist, ergeben sich unter der Berücksichtigung der höheren verarbeiteten Verkehrsmenge vergleichbare Sicherheitsniveaus. Es zeigt sich aber, dass zwischen einzelnen zweistreifigen Kreiseln relativ grosse Unterschiede des Sicherheitsniveaus vorhanden sind. Hier besteht weiterer Klärungsbedarf. Aus diesem Grund muss eine Anordnung eines zweistreifigen Kreisels sorgfältig überlegt und insbesondere aufgrund einer Leistungsanalyse beurteilt werden.

¹ Identisch mit der Unfallziffer in der Schweiz

6 Empfehlungen

6.1 Allgemeine Empfehlungen

6.1.1 Einsatzbereich zweistreifiger Kreisel

Die Anwendung zweistreifiger Kreisel soll dann in Betracht gezogen werden, wenn dies aus Leistungsgründen als zweckmässig beurteilt werden kann.

Bei begrenzten Platzverhältnissen ist stets die Anwendung der Betriebsform 2/1+, also statt zweistreifig markierter Kreisfahrbahn, die einstreifig überbreit ausgebildete Kreisfahrbahn zu prüfen. Deren zweckmässiger Einsatz liegt bei Aussendurchmessern von ca. 30 bis 40 m.

Der Einsatzbereich von Kreiseln mit zweistreifig markierter Fahrbahn ist erst bei einem Aussendurchmesser über 35 m angezeigt. Zweistreifige Kreisel mit Aussendurchmessern grösser als 50 m führen bei mittleren und hohen Verkehrsmengen auf der Kreisfahrbahn zu keiner Leistungssteigerung in den Einfahrten.

6.1.2 Gestaltung zweistreifiger Kreisel

Die betriebliche und geometrische Ausgestaltung zweistreifiger Kreisel ist sorgfältig zu planen. Es sind dabei folgende Grundsätze zu berücksichtigen:

- Bei zweistreifig markierten Kreisel sind zweistreifige Einfahrten nur dort anzuordnen, wo dies aus Leistungs- und Verkehrsqualitätsgründen (Rückstau) erforderlich ist. Wo dies nicht nötig ist, ist aus Gründen der Verkehrssicherheit einer einstreifigen Einfahrt den Vorzug zu geben.
- Bei der Anordnung von Fahrstreifensignalisationen und –markierungen in zweistreifigen Zufahrten ist Zurückhaltung angezeigt. Wie die vorliegende Untersuchung ergab, lässt sich damit die Fahrstreifenbelastung des linken Fahrstreifens nicht in jedem Fall verbessern.
- Die Leistungsfähigkeit gemäss dem Bemessungszusammenhang wird bei ungefähr gleichmässiger Belastung der beiden Fahrstreifen in der Einfahrt (50 % ± 10 %) erreicht. Bei deutlicheren Unterschieden der Belastungen der Fahrstreifen lässt sich die angegebene Leistungsfähigkeit nicht erreichen.
- Die Ausfahrten aus zweistreifigen Kreiseln sind aus Verkehrssicherheitsgründen einstreifig zu gestalten.

6.2 Normung

Das Ziel des Forschungsauftrags bestand im Wesentlichen darin, die Grundlagen für die Ergänzung der Norm „Knoten mit Kreisverkehr“ [1] durch Formulierung eines Bemessungszusammenhangs für zweistreifige Kreisel zu erarbeiten. Dazu kann Folgendes empfohlen werden:

- Zur Ergänzung der Norm SN 640 024a kann der in der vorliegenden Forschungsarbeit hergeleitete Bemessungszusammenhang für Kreiseltyp 2/2 aufgenommen werden.

$$\text{Kreiseltyp 2/2:} \quad Q_E = 1639.9e^{-0.0006 \cdot Q_K} \quad (\text{ohne FG})$$

- Zur Vereinheitlichung wird vorgeschlagen die Bemessungszusammenhänge für alle Kreiseltypen in exponentieller Form darzustellen. Für Kreiseltyp 1/1 sowie 2/1+ können folgende Gleichungen verwendet werden:

$$\text{Kreiseltyp 1/1:} \quad Q_E = 1203.7 \cdot e^{-0.0007 \cdot Q_K} \quad (\text{ohne FG}) \quad [2]$$

$$\text{Kreiseltyp 2/1+:} \quad Q_E = 1607.5 \cdot e^{-0.0006 \cdot Q_K} \quad (\text{ohne FG}) \quad [2], \text{ neu erstellt}$$

- Es wird empfohlen in der Norm für die Kreiseltypen 2/2 und 2/1+ einen gemeinsamen Bemessungszusammenhang anzugeben, da die Kurven fast identisch sind. Dabei ist anzumerken, dass bei Betriebsform 2/1+ auch der Einfluss der Fussgänger zu beachten ist.
- Bezüglich Erreichung der Leistungsfähigkeit gemäss dem Bemessungszusammenhang sind ungefähr gleiche Fahrstreifenbelastungen in der Einfahrt (50 % \pm 10 %) Voraussetzung. Bei ungleichmässiger Belastung (20 % – 30 % auf dem linken Fahrstreifen) ergeben sich im Bereich von mittleren bis grossen Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn um ca. 100 bis 150 PWE/h reduzierte Leistungsfähigkeiten.
- Für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Ausfahrten in einstreifiger Ausbildung kann der Richtwert von 1700 PWE/h (ohne Fussgängereinfluss) verwendet werden.
- Die in Ausarbeitung befindliche Norm „Sicherheitsniveau von Strassenverkehrsanlagen“ soll mit dem hier angegebenen Unfallziffern für die verschiedenen Betriebsformen ergänzt werden.
- Die Norm SN 640 263 „Knoten; Knoten mit Kreisverkehr“ [16] ist mit entsprechenden Angaben für die Projektierung zweistreifiger Kreisel zu ergänzen. Dabei sind auch die Angaben und Erläuterungen bzgl. der Ausfahrten zu überprüfen und wo nötig anzupassen.

6.3 Weiterer Forschungsbedarf

Die Wissenslücken im Bereich der Leistungsfähigkeit von Kreiseln konnten mit der vorliegenden Forschungsarbeit grösstenteils geschlossen werden. Offene Fragen bleiben bezüglich Einflüsse auf die Grössen der Zeitlücken bestehen.

Wesentlichere Fragen sind im Bereich der Verkehrssicherheit bei Kreiseln noch vorhanden. Einerseits besteht hinsichtlich der grossen Differenzen der Unfallziffer zwischen den einzelnen Kreisel Klärungsbedarf, andererseits bestehen noch offene Fragen zu erkannten Auffälligkeiten im Unfallgeschehen. Zur Abklärung der Ursachen sollten gezielt Unfallanalysen zu folgenden durchgeführt werden:

- Häufigkeit und Schwere der Unfälle auf der Kreisfahrbahn.
- Häufigkeit und Schwere der Auffahrunfälle in den Zu- und Einfahrbereichen zu zweistreifigen Kreiseln
- Häufigkeit und Schwere der Schleuder-/Selbstunfälle in Kreiselausfahrten zweistreifiger Kreisel.

Erkenntnisse aus solchen Untersuchungen geben Hinweise für die Projektierung und Gestaltung von zweistreifigen Kreiseln (Ergänzung der SN 640 263).

Gleichzeitig könnten mit solchen Untersuchungen Erkenntnisse zum Einsatzbereich zweistreifiger Kreisel hinsichtlich des DTV abgeleitet werden.

Aufgrund der Unklarheiten und Schwierigkeiten bei der Zuordnung von Unfällen zu den entsprechenden Unfalltypen gemäss Bfs-Codierung ist zu prüfen, ob eine Anpassung der Unfalltypendefinition resp. Ergänzung der Unfalltypen sinnvoll wäre. Dies würde eine Anpassung der Instruktion und des Statistikbogens des Bfs [24] erfordern. Dazu müssten entsprechende Anträge an das ASTRA und das Bfs gestellt werden. Gleichzeitig würde eine Anpassung und Ergänzung der Norm „Strassenverkehrsunfälle, Unfallanalyse“ [23] notwendig.

Anhang

I	Unfalltypen nach SN 640 010	3
II	Übersicht Untersuchungsobjekte	3
III	Übersicht Leistungsfähigkeit einzelne Kreisel	3
IV	Resultate Gruppenanalyse Leistungsfähigkeit der Einfahrten	3
IV.1	Einfluss des Aussendurchmessers auf die Leistungsfähigkeit	3
IV.2	Einfluss der Fahrstreifensignalisation auf die Leistungsfähigkeit.....	3
IV.3	Einfluss der Verteilung in der Einfahrt auf die Leistungsfähigkeit	3
IV.4	Einfluss eines Bypasses auf die Leistungsfähigkeit	3
V	Streuung der Leistungsfähigkeit der Einzelkreisel mit dem Zeitlückenverfahren	3
VI	Übersicht Daten Deutschland.....	3

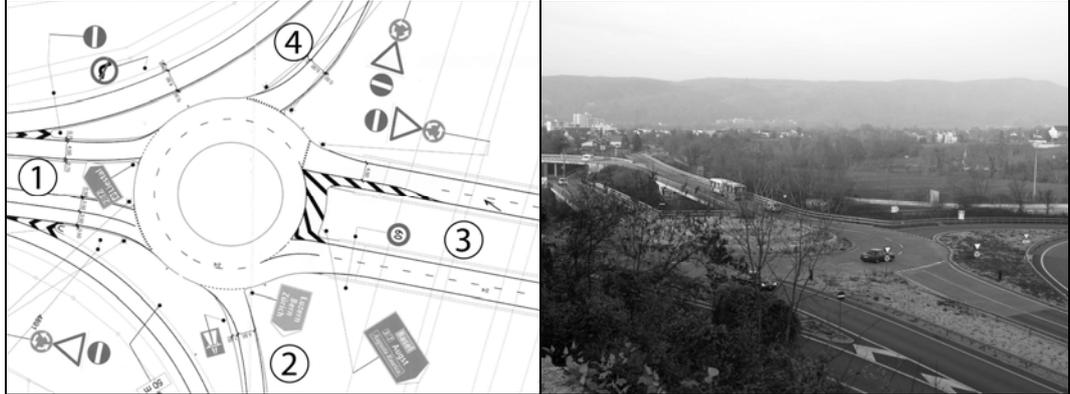
I Unfalltypen nach SN 640 010

Unfalltypen-Gruppen		Unfalltypen	
Nr.	Begriffe	Nr.	Konfliktsituation
0	Fussgänger-Unfall	01 - 09	     
1	Schleuder-Unfall/Selbst-Unfall	11 - 19	      
2	Begegnungs-Unfall (Kreuzen in Längsrichtung)	21 - 29	  
3	Überhol-Unfall	31 - 39	      
4	Auffahrunfall	41 - 49	  
5	Unfall beim Vorbeifahren oder Fahrstreifenwechsel	51 - 59	  
6	Unfall beim Richtungswechsel (mit Abbiegen)	61 - 69	      
7	Unfall beim Queren (ohne Abbiegen)	71 - 79	  
8	Tier-Unfall	81 - 89	   
9	Andere Unfälle	91 - 99	      

II Übersicht Untersuchungsobjekte

1.	Pratteln – Frenkendörferstrasse	Arm 1: Frenkendörferstr. Rtg. Liestal Arm 2: A2 Rtg. Süd Arm 3: Frenkendörferstr. Rtg. Augst Arm 4: A2 Rtg. Nord
----	---------------------------------	---

Situation



Geometrie

Anz. Arme	Form	Durchmesser	Breite Kreisfahrbahn	Bodenmarkierung	FS-Signalisation	Signalisierte Geschwindigkeit
4	Kreisrund	50 m	11.5 m	-	Ja	60 km/h

Ein-/Ausfahrt	Anz. Fahrstreifen Einfahrt	Fahrstreifenbreite Einfahrt	Anz. Fahrstreifen Ausfahrt	Fahrstreifenbreite Ausfahrt	Fussgängerstreifen	Verkehrsmenge
1. Frenkendörferstrasse	2	2 x 3.5 m	1	4.5 m	-	22'500 Fz/Tag (Summe der Einfahrten)
2. A2 Rtg. Süd	-	-	1	4.5 m	-	
3. Frenkendörferstrasse	1	4.5 m	2	3.5 m/5.0 m	-	
4. A2 Rtg. Nord	1	5.0 m	-	-	-	

Unfallgeschehen

Anz. Unfälle: 16

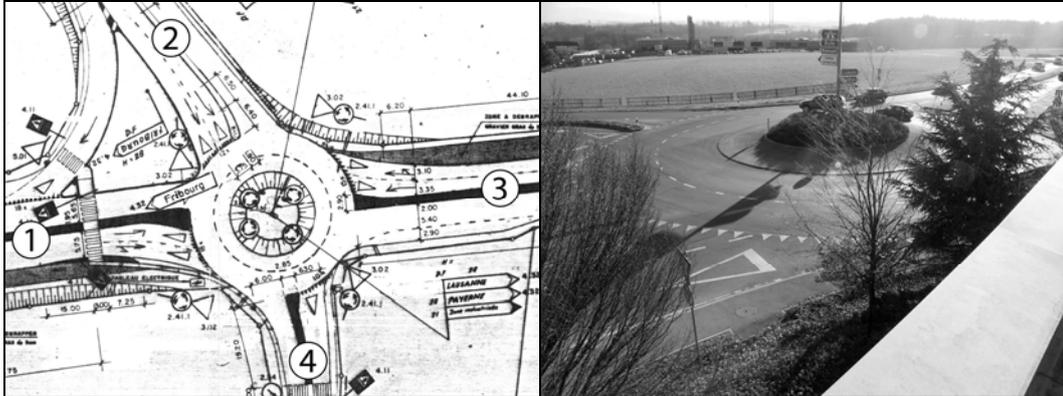
Anz. Verletzte / Tote: 10 / 0

Beobachtungsdauer: 01.07.2005 - 30.06.2008

- Schleuder-/Selbst-Unfall
- Auffahrunfall
- Unfall beim Verbeifahren oder Fahrstreifenwechsel
- Unfall beim Richtungswechsel
- anderer Unfall
- Unfall mit Verletzten

<p>2. Avry-sur-Matran – Avry-sur-Matran</p>	<p>Arm 1: Route de Fribourg Arm 2: Route de Matran Arm 3: Route de Rosé Arm 4: Route des Murailles</p>
---	---

Situation

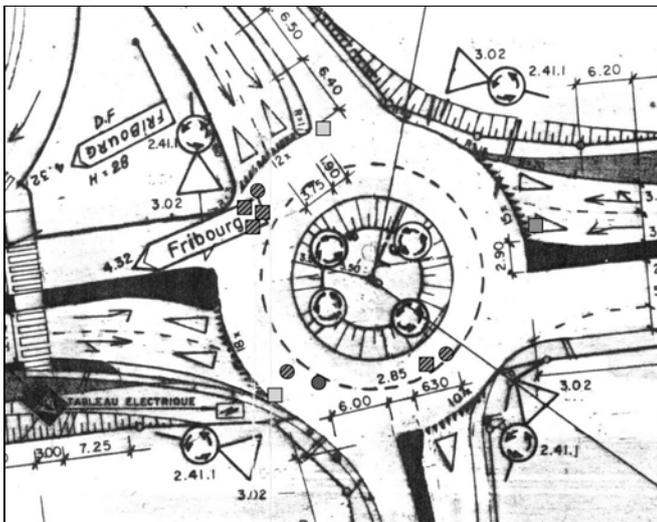


Geometrie

Anz. Arme	Form	Durchmesser	Breite Kreis-fahrbahn	Innenring	Boden-markierung	FS-Signalisation	Signalisierte Geschwin-digkeit
4	Kreisrund	35 m	8.0 m	3.5 m	Ja	-	60 km/h

Ein-/Ausfahrt	Anz. Fahr-streifen Einfahrt	Fahrstreifen-breite Einfahrt	Anz. Fahr-streifen Ausfahrt	Fahrstreifen-breite Aus-fahrt	Fussgänger-streifen	Verkehrsmenge
1. Route de Fribourg	2	2 x 3.75 m	1	5.5 m	Ja	18'500 Fz/Tag (Summe der Einfahrten)
2. Route de Matran	2	2 x 4.0 m	1	5.5 m	-	
3. Route de Rosé	2	2 x 3.5 m	1	5.5 m (8.0 m)	-	
4. Route des Murailles	1	5.0 m	1	4.0 m	Ja	

Unfallgeschehen

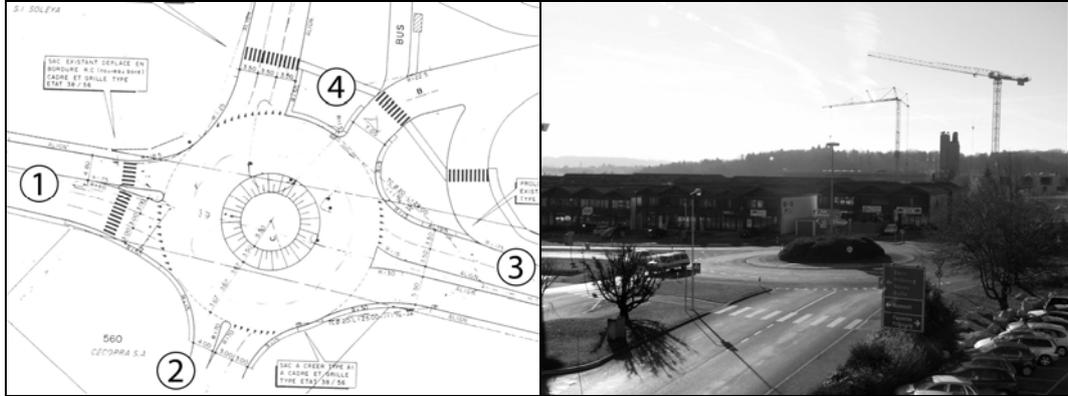


Anz. Unfälle: 11
 Anz. Verletzte / Tote: 7 / 0
 Beobachtungsdauer: 01.01.2003 - 01.01.2008

- Schleuder-/Selbst-Unfall
- Auffahrunfall
- Unfall beim Verbeifahren oder Fahrstreifenwechsel
- Unfall beim Richtungswechsel
- anderer Unfall
- Unfall mit Verletzten

3.	Avry-sur-Matran – Avry-Centre	Arm 1: Route de Matran Rtg. Avry Arm 2: Avry Bourg Arm 3: Route de Matran Rtg. Matran Arm 4: Route de Matran Rtg. Avry-Centre
----	-------------------------------	--

Situation



Geometrie

Anz. Arme	Form	Durchmesser	Breite Kreis-fahrbahn	Innenring	Boden-markierung	FS-Signalisation	Signalisierte Geschwindigkeit
4	Kreisrund	40 m	11.0 m	3.5 m	Arm 1, 3	-	?

Ein-/Ausfahrt	Anz. Fahrstreifen Einfahrt	Fahrstreifenbreite Einfahrt	Anz. Fahrstreifen Ausfahrt	Fahrstreifenbreite Ausfahrt	Fussgängerstreifen	Verkehrsmenge
1. Route de Matran Rtg. Avry	2	2 x 4.5 m	1	4.8 m	Ja	18'500 Fz/Tag (Summe der Einfahrten)
2. Avry Bourg	2	2 x 3.0 m	1	4.0 m	-	
3. Route de Matran	2	2 x 3.5 m	1	5.5 m	-	
4. Route de Matran	2	2 x 5.5 m	1	7.0 m	Ja	

Unfallgeschehen

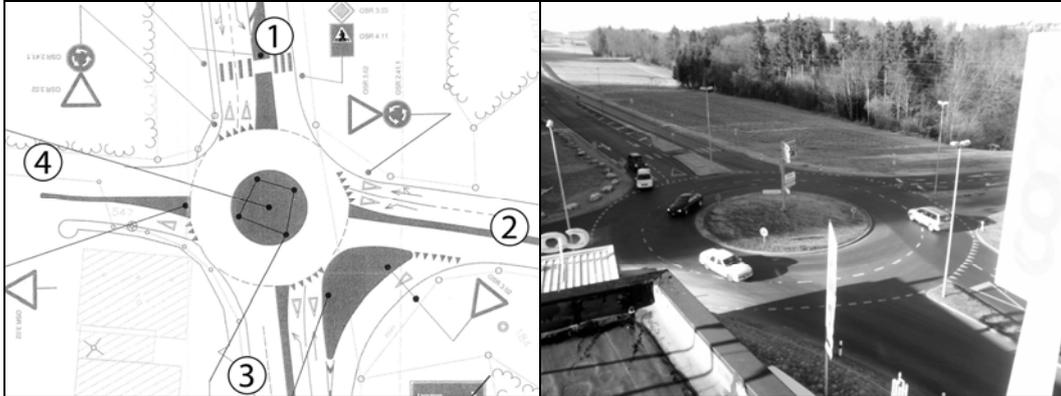
Anz. Unfälle: 8

Anz. Verletzte / Tote: 1 / 0

Beobachtungsdauer: 01.01.2003 - 01.01.2008

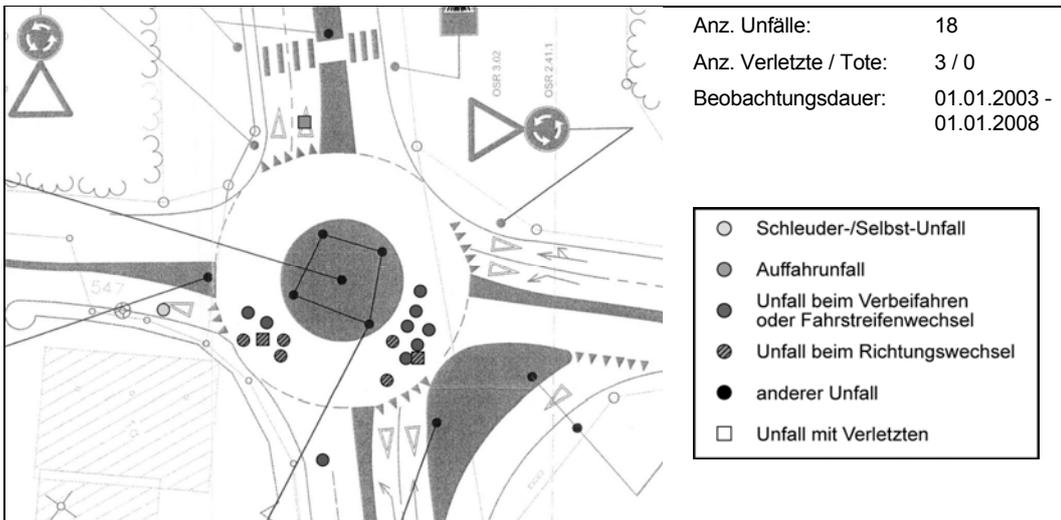
- Schleuder-/Selbst-Unfall
- Auffahrunfall
- Unfall beim Verbeifahren oder Fahrstreifenwechsel
- Unfall beim Richtungswechsel
- anderer Unfall
- Unfall mit Verletzten

4.	Matran – Bois des Morts	Arm 1: Route de Neyruz Rtg. Neyruz Arm 2: Route de la Pâla Arm 3: Route de Neyruz Arm 4: Route du Bois
-----------	--------------------------------	---

Situation**Geometrie**

Anz. Arme	Form	Durchmesser	Breite Kreisfahrbahn	Innenring	Bodenmarkierung	FS-Signalisation	Signalisierte Geschwindigkeit
4	Kreisrund	34 m	9.0 m	-	Ja	-	60 km/h

Ein-/Ausfahrt	Anz. Fahrstreifen Einfahrt	Fahrstreifenbreite Einfahrt	Anz. Fahrstreifen Ausfahrt	Fahrstreifenbreite Ausfahrt	Fussgängerstreifen	Verkehrsmenge
1. Route de Neyruz	2	2 x 3.75 m	1	5.0 m	Ja	21'000 Fz/Tag (Summe der Einfahrten)
2. Route de la Pâla	2	2 x 3.75 m	1	5.0 m	-	
3. Route de Neyruz	2	2 x 3.75 m	2	2 x 4.0 m	-	
4. Route du Bois	1	4.5 m	1	6.0 m	-	

Unfallgeschehen

5. Murten – Löwenberg	Arm 1: Rtg. A1 Arm 2: Rtg. Le Vully Arm 3: Löwenberg Rtg. Murten Arm 4: Alte Badenerstrasse
-----------------------	--

Situation



Geometrie

Anz. Arme	Form	Durchmesser	Breite Kreisfahrbahn	Innenring	Bodenmarkierung	FS-Signalisation	Signalisierte Geschwindigkeit
4	Kreisrund	40 m	9.0 m	2.0 m	Ja	-	60 km/h

Ein-/Ausfahrt	Anz. Fahrstreifen Einfahrt	Fahrstreifenbreite Einfahrt	Anz. Fahrstreifen Ausfahrt	Fahrstreifenbreite Ausfahrt	Fussgängerstreifen	Verkehrsmenge
1. Rtg. A1	2	2 x 3.0 m	1	5.0 m	-	20'500 Fz/Tag (Summe der Einfahrten)
2. Rtg. Le Vully	2	2 x 3.0 m	1	5.0 m	-	
3. Löwenberg Rtg. Murten	2	2 x 3.0 m	1	5.0 m	-	
4 : Alte Badenerstrasse	1	3.0 m	1	3.0 m	-	

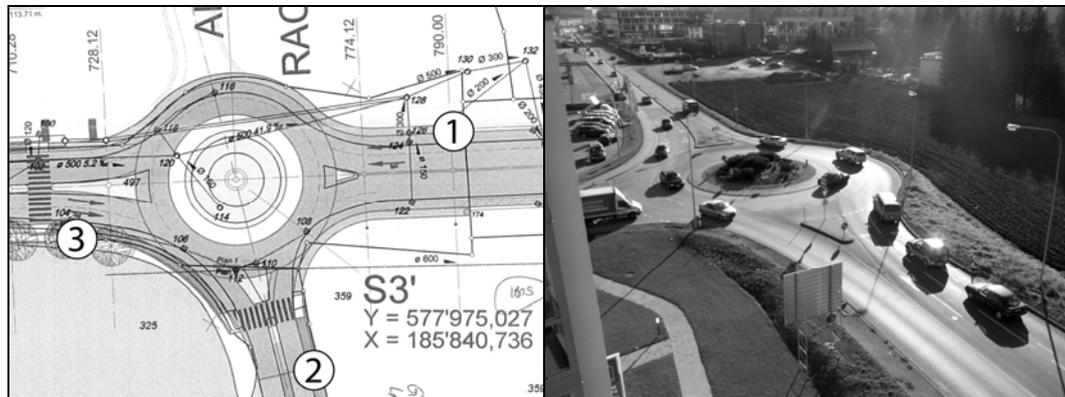
Unfallgeschehen

Anz. Unfälle: 5
 Anz. Verletzte / Tote: 2 / 0
 Beobachtungsdauer: 01.01.2003 - 01.01.2008

- Schleuder-/Selbst-Unfall
- Auffahrunfall
- Unfall beim Verbeifahren oder Fahrstreifenwechsel
- ⊗ Unfall beim Richtungswechsel
- anderer Unfall
- Unfall mit Verletzten

<p>6. Granges-Paccot – Lavapesson</p>	<p>Arm 1: Route de Morat Rtg. A12 Arm 2: Route du Lac Arm 3: Route de Morat Rtg. Fribourg</p>
---------------------------------------	---

Situation



Geometrie

Anz. Arme	Form	Durchmesser	Breite Kreisfahrbahn	Innenring	Bodenmarkierung	FS-Signalisation	Signalisierte Geschwindigkeit
3	Kreisrund	36 m	9.0 m	4.0 m	Ja	-	60 km/h

Ein-/Ausfahrt	Anz. Fahrstreifen Einfahrt	Fahrstreifenbreite Einfahrt	Anz. Fahrstreifen Ausfahrt	Fahrstreifenbreite Ausfahrt	Fussgängerstreifen	Verkehrsmenge
1. Route de Morat Rtg. A12	2	2 x 3.5 m	1	5.5 m	-	21'000 Fz/Tag (Summe der Einfahrten)
2. Route du Lac	1	4.5 m	1	4.0 m	Ja	
3. Route de Morat Rtg. Frib.	2	2 x 3.0 m	1	5.5 m	-	

Unfallgeschehen

Anz. Unfälle: 6
 Anz. Verletzte / Tote: 1 / 0
 Beobachtungsdauer: 01.01.2003 - 01.01.2008

- Schleuder-/Selbst-Unfall
- Auffahrunfall
- Unfall beim Verbeifahren oder Fahrstreifenwechsel
- Unfall beim Richtungswechsel
- anderer Unfall
- Unfall mit Verletzten

7.	Granges-Paccot – Chenevière	Arm 1: Rtg. Cormagens Arm 2: Autobahzubringer A12 Arm 3: Rtg. Fribourg Arm 4: Chemin de La Madeleine
----	-----------------------------	---

Situation



Geometrie

Anz. Arme	Form	Durchmesser	Breite Kreisfahrbahn	Innenring	Bodenmarkierung	FS-Signalisation	Signalisierte Geschwindigkeit
4	Kreisrund	~ 42 m	~ 12.0 m	-	Arm 1	Arm 3	60 km/h

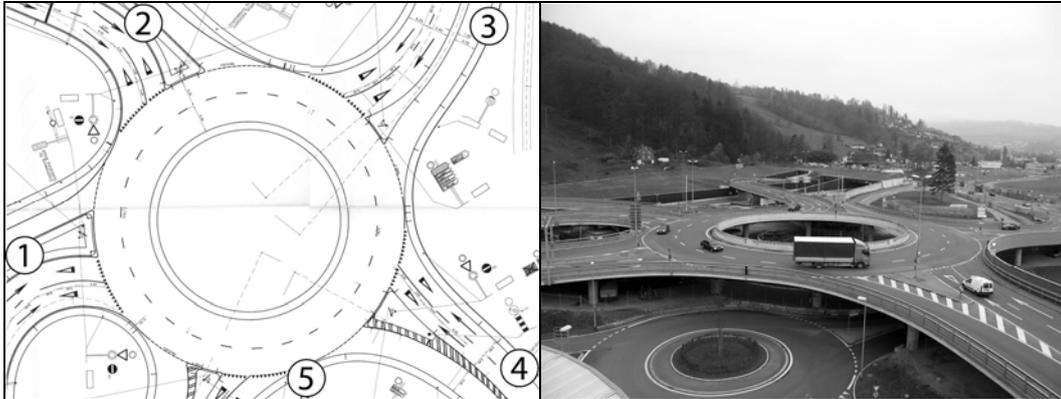
Ein-/Ausfahrt	Anz. Fahrstreifen Einfahrt	Fahrstreifenbreite Einfahrt	Anz. Fahrstreifen Ausfahrt	Fahrstreifenbreite Ausfahrt	Fussgängerstreifen	Verkehrsmenge
1. Rtg. Cormagens	2		1		-	Keine Angaben
2. Autobahzubringer A12	1		1		-	
3. Rtg. Fribourg	2		1		-	
4. Chemin de la Madeleine	1		1		Ja	

Unfallgeschehen

Keine Angaben

8. Kriens – Schlund	Arm 1: Anschluss A2 Rtg. Süd Arm 2: Anschluss A2 Rtg. Nord Arm 3: Grabenhof Arm 4: Ringstrasse Arm 5: Rtg. Hergiswil
----------------------------	--

Situation



Geometrie

Anz. Arme	Form	Durchmesser	Breite Kreisfahrbahn	Innenring	Bodenmarkierung	FS-Signalisation	Signalisierte Geschwindigkeit
5	Kreisrund	60 m	10.7 m	1.2 m	-	Ja	60 km/h

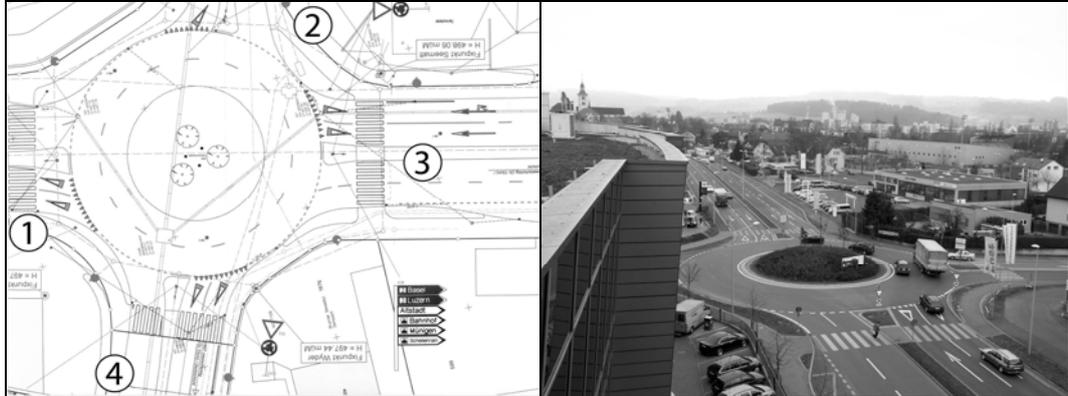
Ein-/Ausfahrt	Anz. Fahrstreifen Einfahrt	Fahrstreifenbreite Einfahrt	Anz. Fahrstreifen Ausfahrt	Fahrstreifenbreite Ausfahrt	Fussgängerstreifen	Verkehrsmenge
1. Anschluss A2 Rtg. Süd	2	2 x 4.75 m	1	4.0 m	-	21'038 Fz/Tag (Summe der Einfahrten)
2. Anschluss A2 Rtg. Nord	2	4.0 m/4.5 m	1	4.5 m	-	
3. Grabenhof	2	2 x 5.0 m	1	5.0 m	-	
4. Ringstrasse	2	2 x 3.75 m	1	5.0 m	-	
5. Rtg. Hergiswil	2	3.25 m/3.75 m	1	6.0 m	-	

Unfallgeschehen

	Anz. Unfälle:	10
	Anz. Verletzte / Tote:	3 / 0
	Beobachtungsdauer:	2004 – Juni 2008
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Schleuder-/Selbst-Unfall ● Auffahrunfall ● Unfall beim Verbeifahren oder Fahrstreifenwechsel ⊗ Unfall beim Richtungswechsel ● anderer Unfall □ Unfall mit Verletzten 	

<p>9. Sursee – Glockenstrasse</p>	<p>Arm 1: Surentalstrasse Rtg. AB Arm 2: Glockenstrasse Arm 3: Surentalstrasse Rtg. Zentrum Arm 4: Glockenstrasse</p>
-----------------------------------	--

Situation



Geometrie

Anz. Arme	Form	Durchmesser	Breite Kreisfahrbahn	Innenring	Bodenmarkierung	FS-Signalisation	Signalisierte Geschwindigkeit
4	Kreisrund	38 m	8.6 m	2.0 m	Ja	Ja	60 km/h

Ein-/Ausfahrt	Anz. Fahrstreifen Einfahrt	Fahrstreifenbreite Einfahrt	Anz. Fahrstreifen Ausfahrt	Fahrstreifenbreite Ausfahrt	Fussgängerstreifen	Verkehrsmenge
1. Surentalstr. Rtg. AB	2	2 x 3.5 m	2	2 x 3.5 m	Ja	22'300 Fz/Tag (Summe der Einfahrten)
2. Glockenstrasse	1	2 x 3.75 m	1	4.0 m	Ja	
3. Surentalstr. Rtg. Zentrum	2	2 x 3.5 m	2	2 x 3.5 m	Ja	
4. Glockenstrasse	2	2 x 3.5 m	1	5.0 m	Ja	

Unfallgeschehen

Anz. Unfälle: 28
 Anz. Verletzte / Tote: 4 / 0
 Beobachtungsdauer: 2004 – Juni 2008

- Schleuder-/Selbst-Unfall
- Auffahrunfall
- Unfall beim Verbeifahren oder Fahrstreifenwechsel
- ◐ Unfall beim Richtungswechsel
- anderer Unfall
- Unfall mit Verletzten

<p>10. Sursee – Schlottermilch</p>	<p>Arm 1: Ringstrasse West Arm 2: Surentalstrasse Arm 3: Ringstrasse Ost Arm 4: Schlottermilch</p>
------------------------------------	---

Situation



Geometrie

Anz. Arme	Form	Durchmesser	Breite Kreisfahrbahn	Innenring	Bodenmarkierung	FS-Signalisation	Signalisierte Geschwindigkeit
4	Kreisrund	36 m	9.0 m	1.0 m	-	-	60 km/h

Ein-/Ausfahrt	Anz. Fahrstreifen Einfahrt	Fahrstreifenbreite Einfahrt	Anz. Fahrstreifen Ausfahrt	Fahrstreifenbreite Ausfahrt	Fussgängerstreifen	Verkehrsmenge
1. Ringstrasse West	2	2 x 3.5 m	1	4.5 m	Ja	28'911 Fz/Tag (Summe der Einfahrten)
2. Surentalstrasse	2	2 x 3.5 m	1	4.5 m	Ja	
3. Ringstrasse Ost	2	2 x 3.5 m	1	4.5 m	Ja	
4. Schlottermilch	2	2 x 3.0 m	1	3.75 m	Ja	

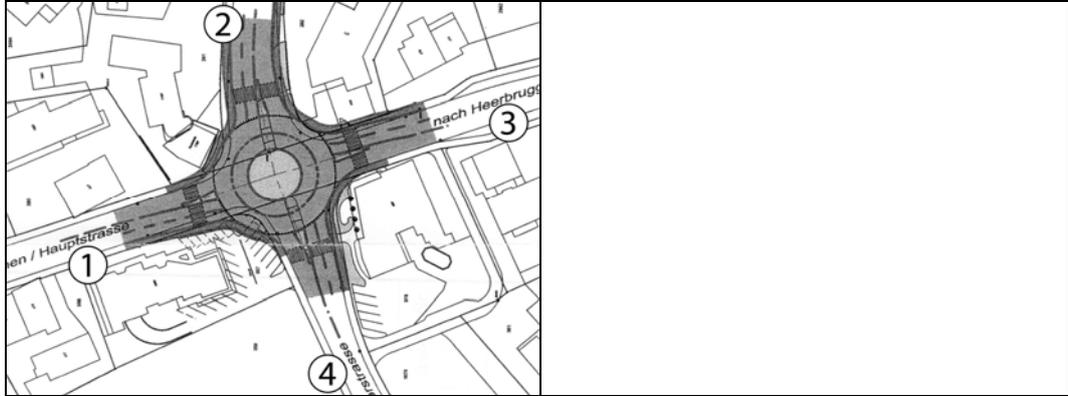
Unfallgeschehen

Anz. Unfälle: 6
 Anz. Verletzte / Tote: 1 / 0
 Beobachtungsdauer: 08.2006 – 06.2008

- Schleuder-/Selbst-Unfall
- Auffahrunfall
- Unfall beim Verbeifahren oder Fahrstreifenwechsel
- ◐ Unfall beim Richtungswechsel
- anderer Unfall
- Unfall mit Verletzten

11. Au (SG) – Adlerkreuzung	Arm 1: Hauptstr. Rtg. Norden Arm 2: Zollstrasse Arm 3: Hauptstr. Rtg. Heerbrugg Arm 4: Berneckerstrasse
-----------------------------	--

Situation



Geometrie

Anz. Arme	Form	Durchmesser	Breite Kreis-fahrbahn	Innenring	Boden-markierung	FS-Signalisation	Signalisierte Geschwin-digkei
4	Kreisrund	34 m	9.5 m	-	-	Ja	?

Ein-/Ausfahrt	Anz. Fahr-streifen Einfahrt	Fahrstreifen-breite Ein-fahrt	Anz. Fahr-streifen Ausfahrt	Fahrstreifen-breite Aus-fahrt	Fussgänger-streifen	Verkehrs-menge
1. Hauptstr. Rtg. Norden	2	6.0 m	1	4.0 m	Ja	19'600 Fz/Tag (Summe der Einfahrten)
2. Zollstrasse	2	6.5 m	1	4.5 m	Ja	
3. Hauptstr. Rtg. Heerbrugg	2	6.0 m	1	4.0 m	Ja	
4. Berneckerstrasse	2	6.5 m	1	4.0 m	Ja	

Unfallgeschehen

Anz. Unfälle: 12

Anz. Verletzte / Tote: 3 / 0

Beobachtungsdauer: 01.06.2003 - 31.05.2008

- Schleuder-/Selbst-Unfall
- Auffahrunfall
- Unfall beim Verbeifahren oder Fahrstreifenwechsel
- ⊗ Unfall beim Richtungswechsel
- anderer Unfall
- Unfall mit Verletzten

12. Schindellegi – Soleil-Kreisel	Arm 1: Rtg. Einsiedeln Arm 2: Pfäffikerstrasse Arm 3: Rtg. Dorfstrasse Arm 4: Rtg. Dorf Schindellegi
-----------------------------------	---

Situation

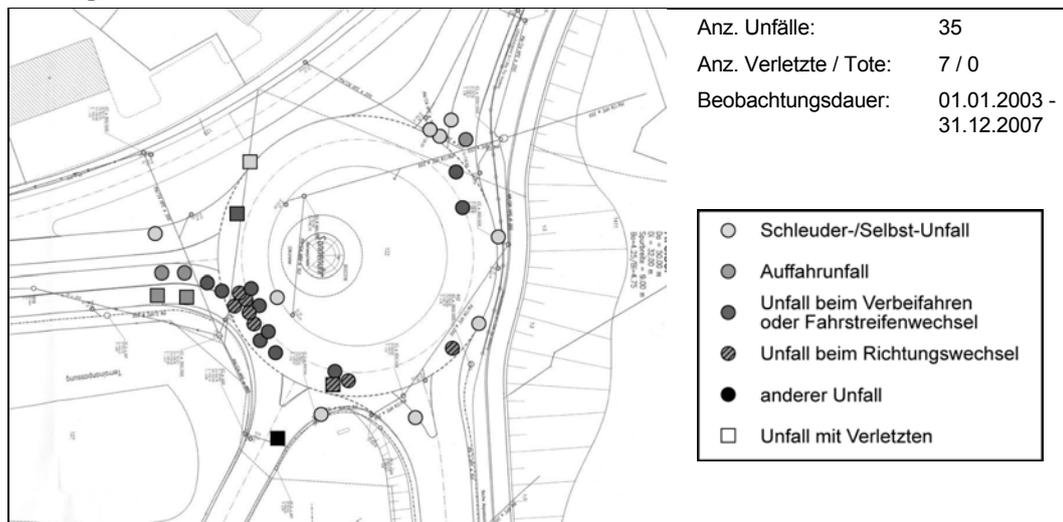


Geometrie

Anz. Arme	Form	Durchmesser	Breite Kreisfahrbahn	Innenring	Bodenmarkierung	FS-Signalisation	Signalisierte Geschwindigkeit
4	Kreisrund	50 m	9.0 m	-	-	Ja	?

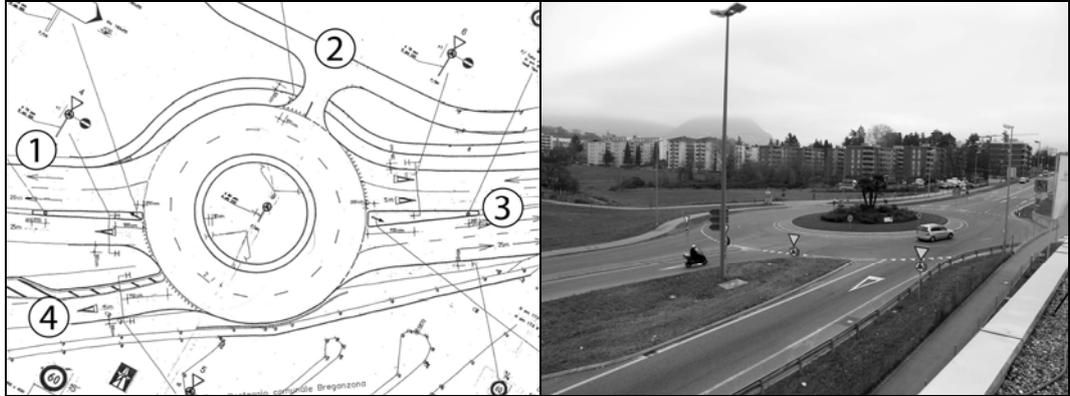
Ein-/Ausfahrt	Anz. Fahrstreifen Einfahrt	Fahrstreifenbreite Einfahrt	Anz. Fahrstreifen Ausfahrt	Fahrstreifenbreite Ausfahrt	Fussgängerstreifen	Verkehrsmenge
1. Rtg. Einsiedeln	2	2 x 3.75 m	1	4.6 m	-	23'500 Fz/Tag (Summe der Einfahrten)
2. Pfäffikerstrasse	1	4.8 m	1	5.0 m	-	
3. Rtg. Dorfstrasse	1	5.4 m	1	5.0 m	-	
4. Rtg. Dorf Schindellegi	1	4.6 m	1	3.8 m	-	

Unfallgeschehen



13. Lugano – Povro	Arm 1: Via Borgio Arm 2: Via Bioggio Arm 3: Via Bioggio Rtg. Lugano Arm 4: A2 Ausfahrt
--------------------	---

Situation



Geometrie

Anz. Arme	Form	Durchmesser	Breite Kreis-fahrbahn	Innenring	Boden-markierung	FS-Signalisation	Signalisierte Geschwin-digkei
4	Kreisrund	40 m	9.5 m	1.5 m	-	-	60 km/h

Ein-/Ausfahrt	Anz. Fahr-streifen Einfahrt	Fahrstreifen-breite Einfahrt	Anz. Fahr-streifen Ausfahrt	Fahrstreifen-breite Aus-fahrt	Fussgänger-streifen	Verkehrs-menge
1. Via Borgio	1	5.0 m	2	2 x 4.5 m	-	24'709 Fz/Tag (Summe der Einfahrten)
2. Via Bioggio	1	3.0 m	1	2.5 m	-	
3. Via Bioggio Rtg. Lugano	2	2 x 4.0 m	2	2 x 4.0 m	-	
4. A2 Ausfahrt	1	5.0 m	-	-	-	

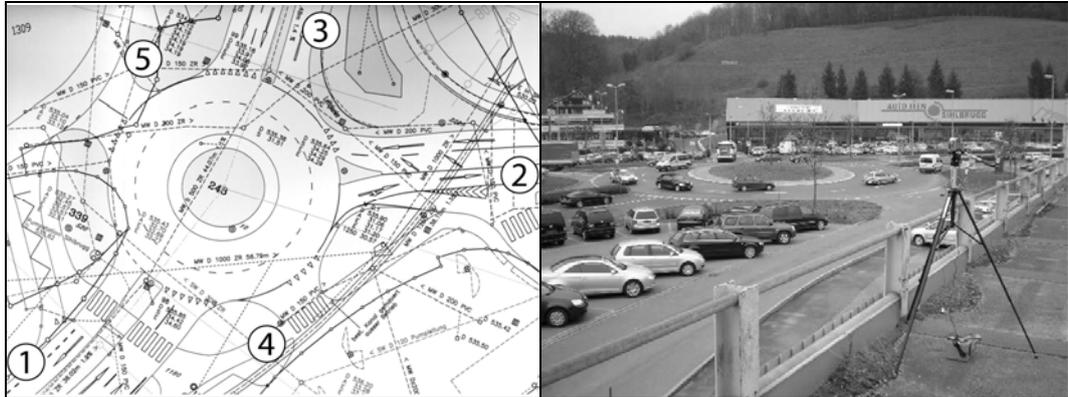
Unfallgeschehen

Anz. Unfälle: 19
 Anz. Verletzte / Tote: k.A.
 Beobachtungsdauer: 01.01.2003 - 01.01.2008

- Schleuder-/Selbst-Unfall
- Auffahrunfall
- Unfall beim Verbeifahren oder Fahrstreifenwechsel
- ⊗ Unfall beim Richtungswechsel
- anderer Unfall
- Unfall mit Verletzten

15. Neuheim – Sihlbrugg	Arm 1: Zugerstr. Rtg. Sihlbrugg Arm 2: Zugerstr. Rtg. Neuheim Arm 3: Sihltalstrasse Arm 4: Rest. Löwen Arm 5: Sihltor
-------------------------	---

Situation



Geometrie

Anz. Arme	Form	Durchmesser	Breite Kreis-fahrbahn	Innenring	Boden-markierung	FS-Signalisation	Signalisierte Geschwin-digkei
5	Kreisrund	42	11	6	Ja	-	?

Ein-/Ausfahrt	Anz. Fahr-streifen Einfahrt	Fahrstreifen-breite Einfahrt	Anz. Fahr-streifen Ausfahrt	Fahrstreifen-breite Aus-fahrt	Fussgänger-streifen	Verkehrs-menge
1. Zugerstr. Rtg. Sihlbrugg	2	3.5 m/5,0 m	1	5.0 m	Ja	37'204 Fz/Tag (Summe der Einfahrten)
2. Zugerstr. Rtg. Neuheim	1	5.0 m	1	5.0 m	-	
3. Sihltalstrasse	2	3.5 m/4.75 m	1	5.0 m	-	
4: Rest. Löwen	1	4.5 m	1	4.5 m	Ja	
5: Sihltor	1	6.0 m	1	6.0 m	-	

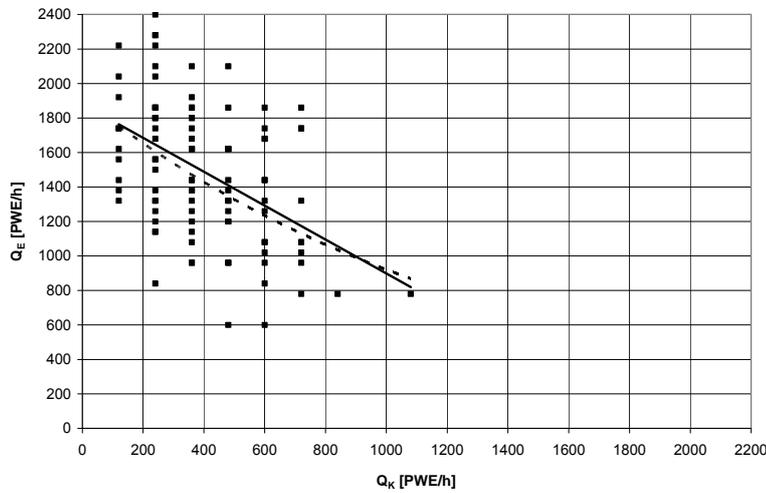
Unfallgeschehen

Anz. Unfälle: 46
 Anz. Verletzte / Tote: 6 / 0
 Beobachtungsdauer: 01.01.2003 - 31.12.2007

- Schleuder-/Selbst-Unfall
- Auffahrunfall
- Unfall beim Verbeifahren oder Fahrstreifenwechsel
- ◐ Unfall beim Richtungswechsel
- anderer Unfall
- Unfall mit Verletzten

III Übersicht Leistungsfähigkeit einzelne Kreisel

Kreisel 1



— Lineare Trendlinie

$$y = 1881.3 - 0.9835x$$

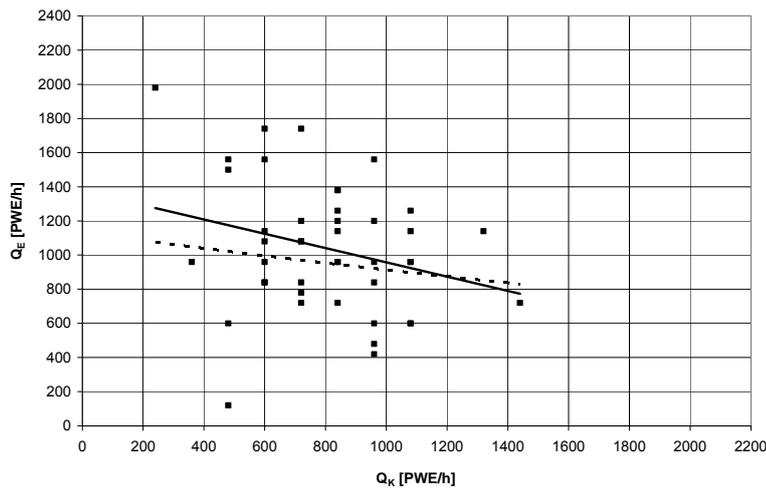
$$R^2 = 0.2186$$

---- Exponentielle Trendlinie

$$y = 1913.8 \cdot e^{-0.0007x}$$

$$R^2 = 0.2302$$

Kreisel 2



— Lineare Trendlinie

$$y = 1375.9 - 0.4183x$$

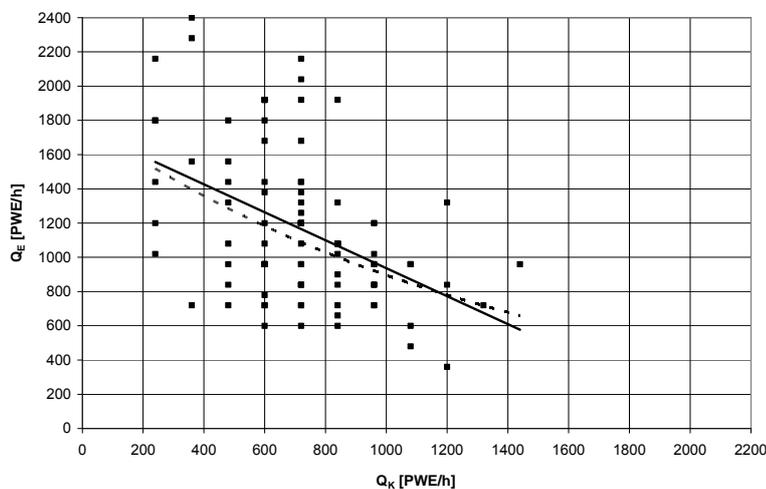
$$R^2 = 0.0725$$

---- Exponentielle Trendlinie

$$y = 1133.6 \cdot e^{-0.0002x}$$

$$R^2 = 0.0126$$

Kreisel 3



— Lineare Trendlinie

$$y = 1752.5 - 0.816x$$

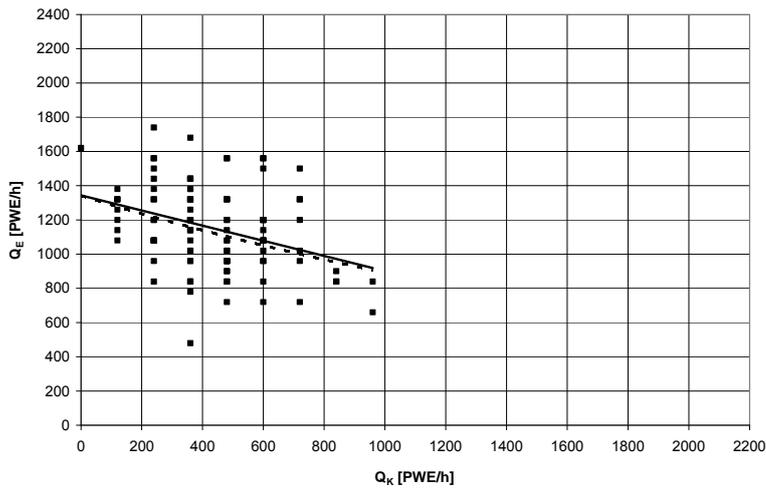
$$R^2 = 0.2038$$

---- Exponentielle Trendlinie

$$y = 1793.1 \cdot e^{-0.0007x}$$

$$R^2 = 0.2059$$

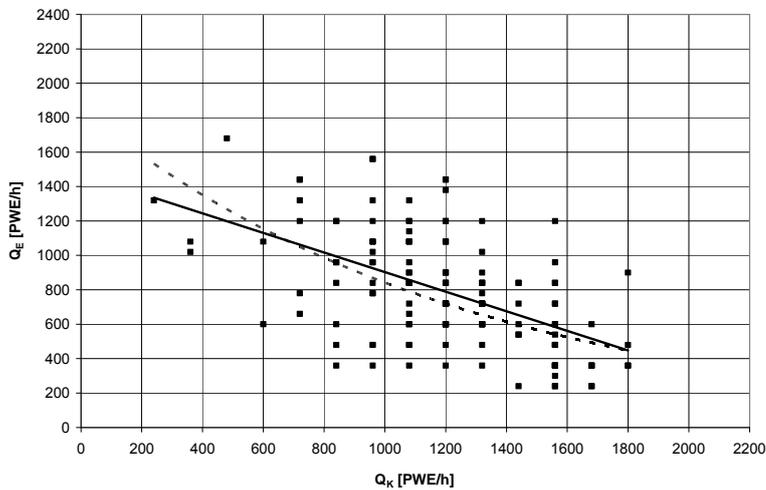
Kreisel 4.1



— Lineare Trendlinie
 $y = 1343.4 - 0.4422x$
 $R^2 = 0.1201$

- - - Exponentielle Trendlinie
 $y = 1341.8 \cdot e^{-0.0004x}$
 $R^2 = 0.1215$

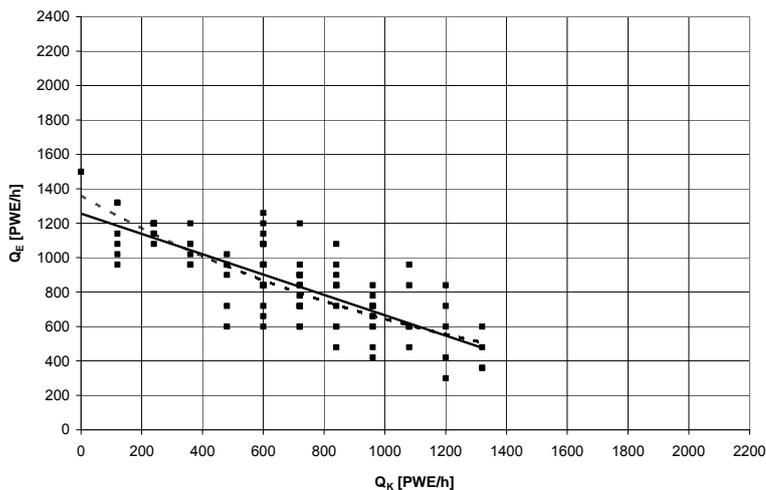
Kreisel 4.2



— Lineare Trendlinie
 $y = 1472.2 - 0.5691x$
 $R^2 = 0.2901$

- - - Exponentielle Trendlinie
 $y = 1851.5 \cdot e^{-0.0008x}$
 $R^2 = 0.29$

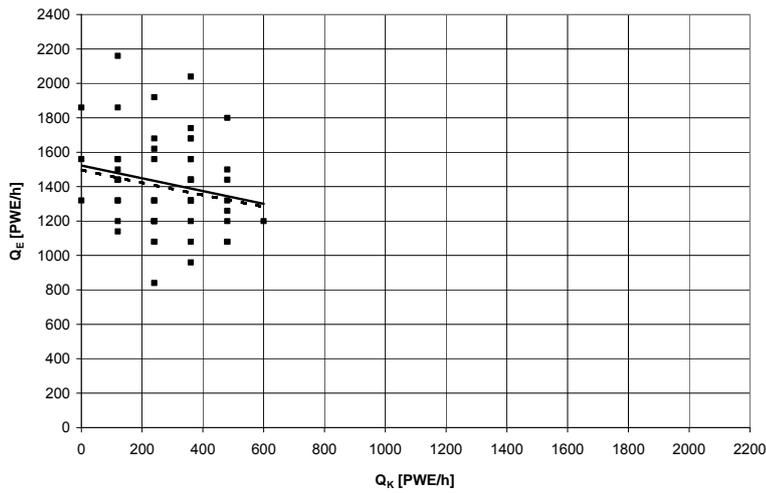
Kreisel 5



— Lineare Trendlinie
 $y = 1256.8 - 0.5909x$
 $R^2 = 0.5923$

- - - Exponentielle Trendlinie
 $y = 1360.2 \cdot e^{-0.0007x}$
 $R^2 = 0.5675$

Kreisel 6.1



— Lineare Trendlinie
 $y = 1523.1 - 0.3719x$

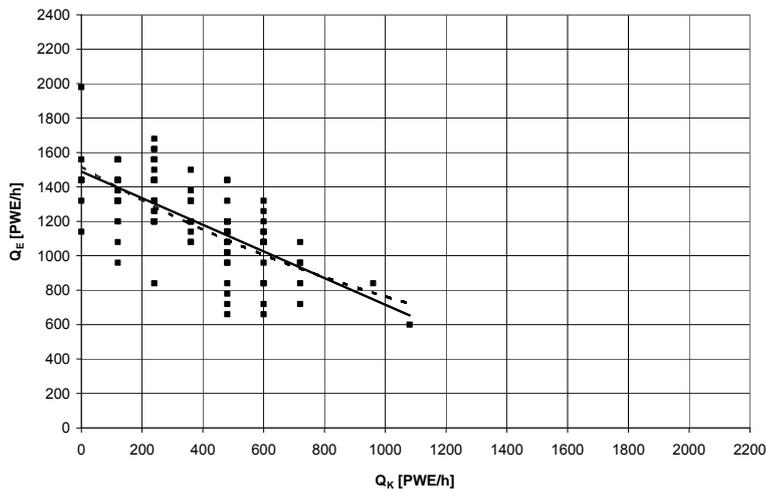
$R^2 = 0.039$

--- Exponentielle Trendlinie

$y = 1497.0 \cdot e^{-0.0003x}$

$R^2 = 0.0376$

Kreisel 6.2



— Lineare Trendlinie
 $y = 1489.7 - 0.7745x$

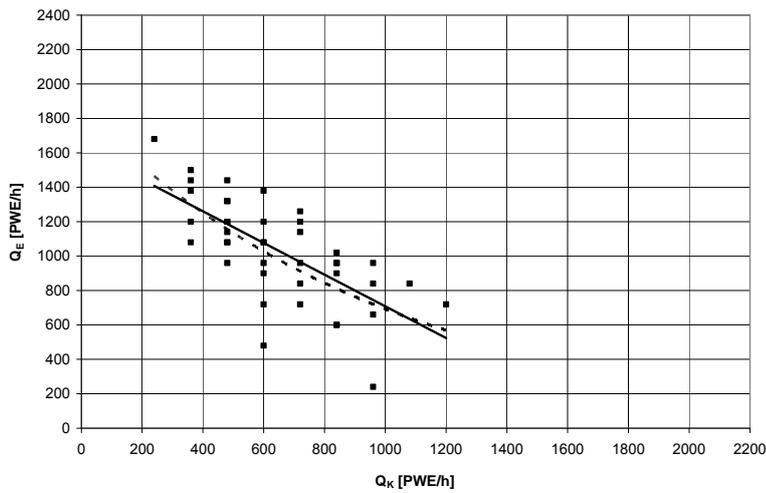
$R^2 = 0.4574$

--- Exponentielle Trendlinie

$y = 1516.7 \cdot e^{-0.0007x}$

$R^2 = 0.4566$

Kreisel 7



— Lineare Trendlinie
 $y = 1628.2 - 0.9203x$

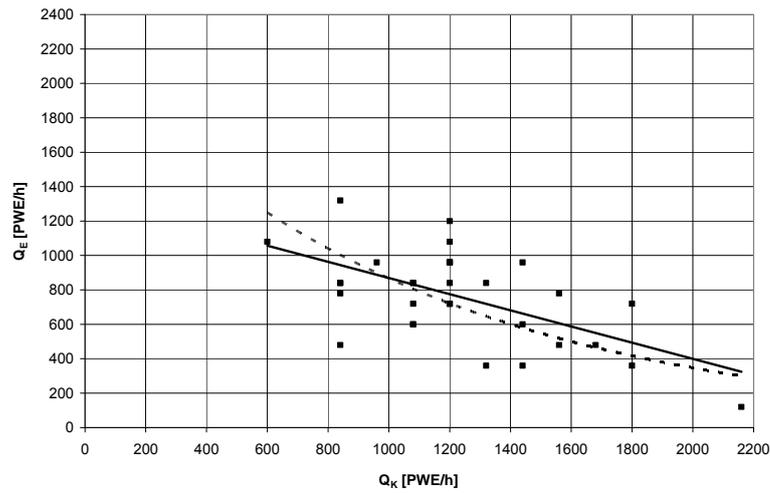
$R^2 = 0.4779$

--- Exponentielle Trendlinie

$y = 1855.3 \cdot e^{-0.001x}$

$R^2 = 0.3822$

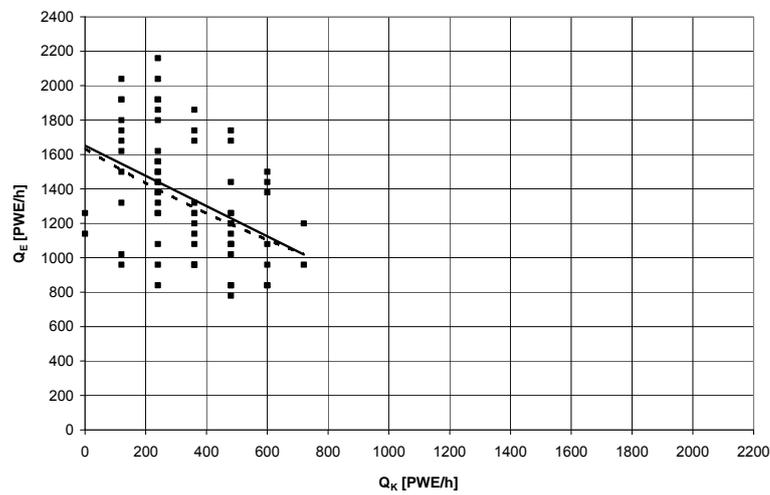
Kreisel 8



— Lineare Trendlinie
 $y = 1338.8 - 0.4695x$
 $R^2 = 0.3441$

---- Exponentielle Trendlinie
 $y = 2163.8 \cdot e^{-0.0009x}$
 $R^2 = 0.4208$

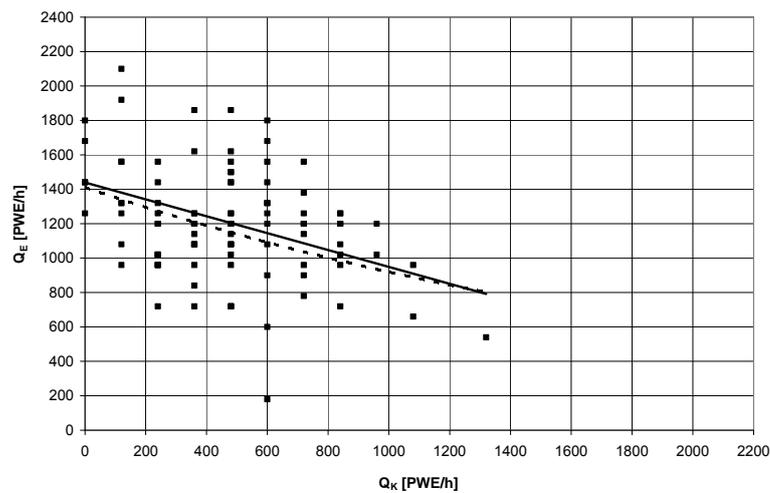
Kreisel 9.1



— Lineare Trendlinie
 $y = 1651.5 - 0.8782x$
 $R^2 = 0.1837$

---- Exponentielle Trendlinie
 $y = 1633.4 \cdot e^{-0.0007x}$
 $R^2 = 0.1834$

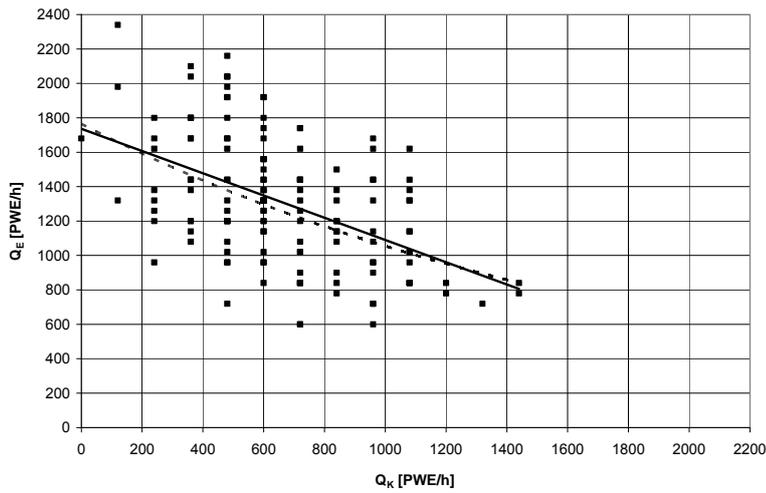
Kreisel 9.2



— Lineare Trendlinie
 $y = 1439.4 - 0.491x$
 $R^2 = 0.1439$

---- Exponentielle Trendlinie
 $y = 1411.0 \cdot e^{-0.0004x}$
 $R^2 = 0.1215$

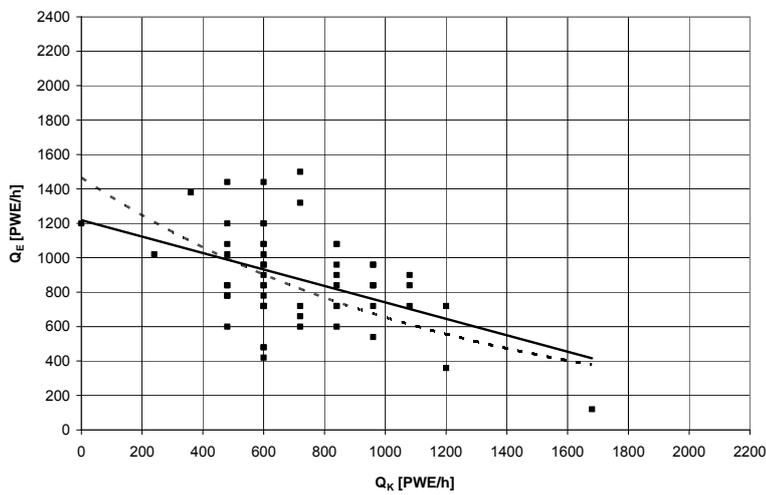
Kreisel 10



— Lineare Trendlinie
 $y = 1735.8 - 0.646x$
 $R^2 = 0.2423$

---- Exponentielle Trendlinie
 $y = 1764.8 \cdot e^{-0.0005x}$
 $R^2 = 0.2454$

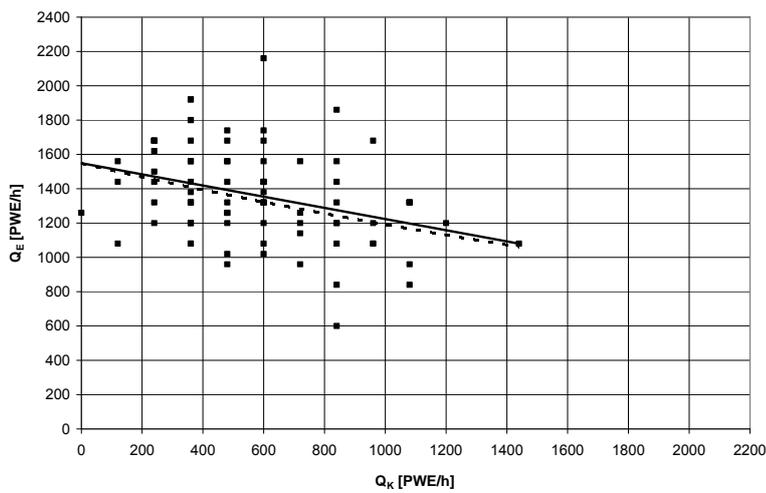
Kreisel 11



— Lineare Trendlinie
 $y = 1218.4 - 0.4778x$
 $R^2 = 0.2139$

---- Exponentielle Trendlinie
 $y = 1465.8 \cdot e^{-0.0008x}$
 $R^2 = 0.2912$

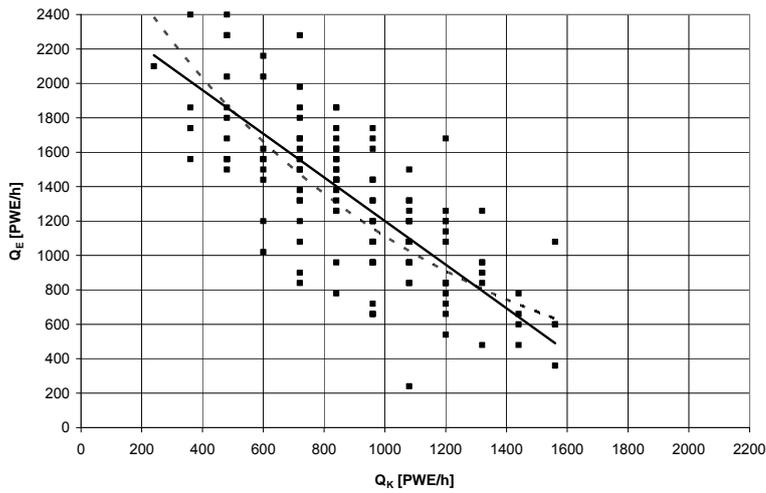
Kreisel 13



— Lineare Trendlinie
 $y = 1548.6 - 0.3258x$
 $R^2 = 0.1108$

---- Exponentielle Trendlinie
 $y = 1547.3 \cdot e^{-0.0003x}$
 $R^2 = 0.1215$

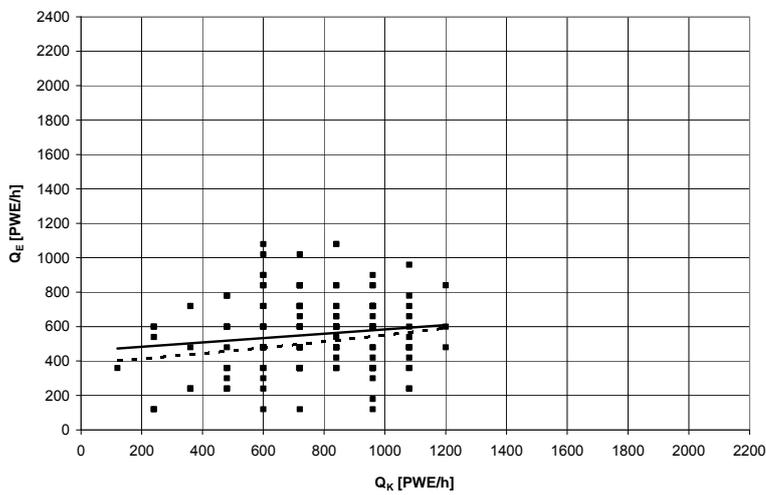
Kreisel 14



— Lineare Trendlinie
 $y = 2468.5 - 1.2683x$
 $R^2 = 0.5904$

- - - Exponentielle Trendlinie
 $y = 3034.8 \cdot e^{-0.001x}$
 $R^2 = 0.5454$

Kreisel 15



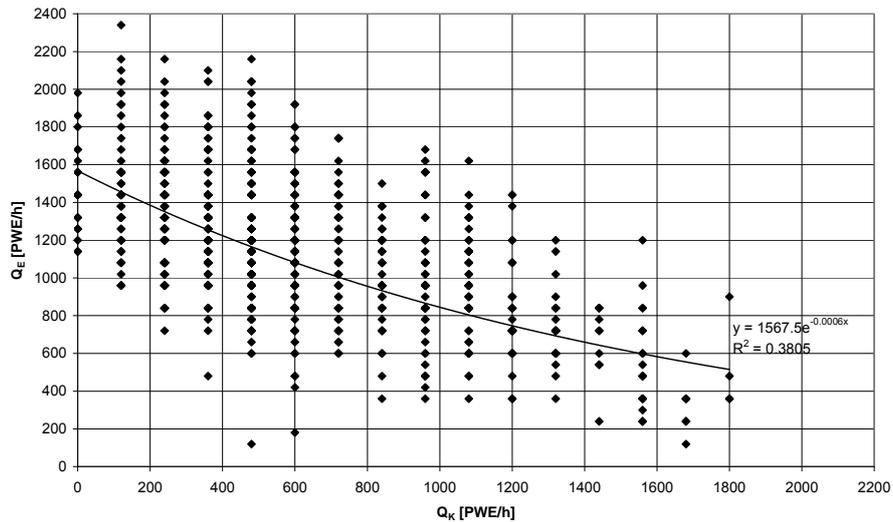
— Lineare Trendlinie
 $y = 458 + 0.1259x$
 $R^2 = 0.0186$

- - - Exponentielle Trendlinie
 $y = 384.92 \cdot e^{0.0004x}$
 $R^2 = 0.4566$

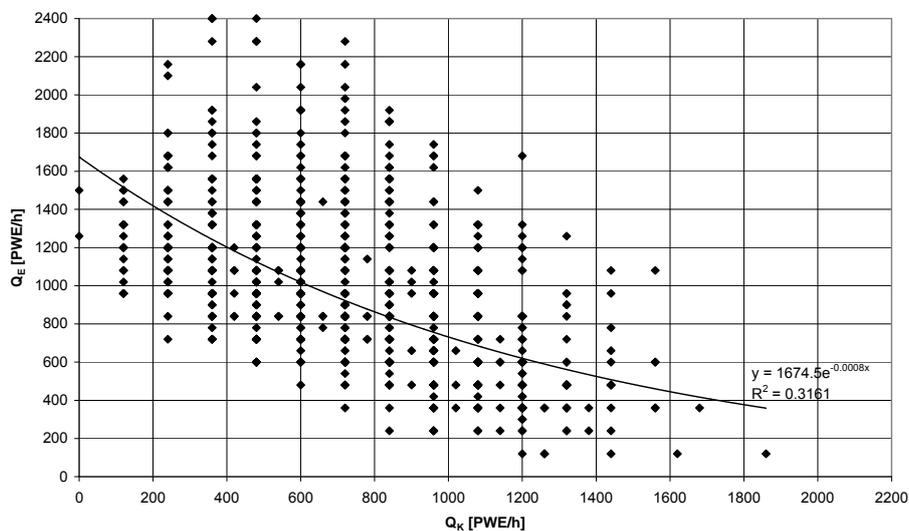
IV Resultate Gruppenanalyse Leistungsfähigkeit der Einfahrten

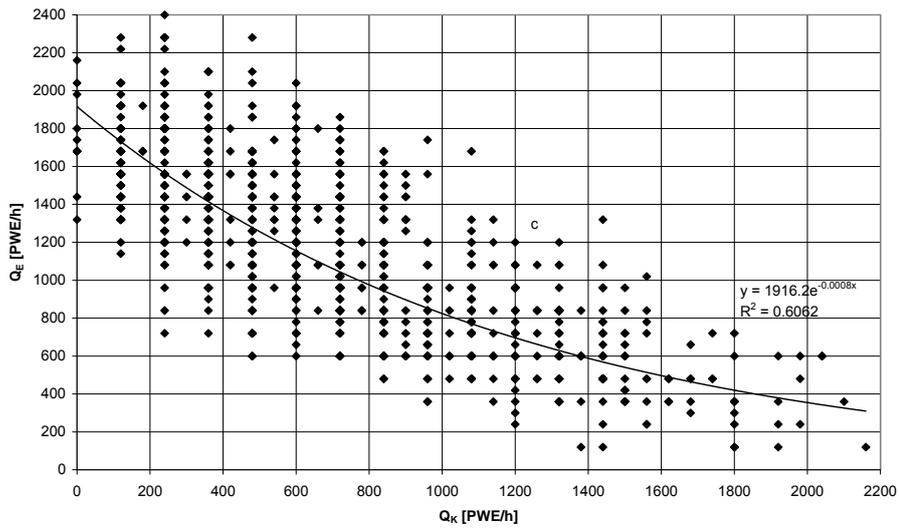
IV.1 Einfluss des Aussendurchmessers auf die Leistungsfähigkeit

Gruppe 1: Aussendurchmesser < 40m (9 Kreiselarme)



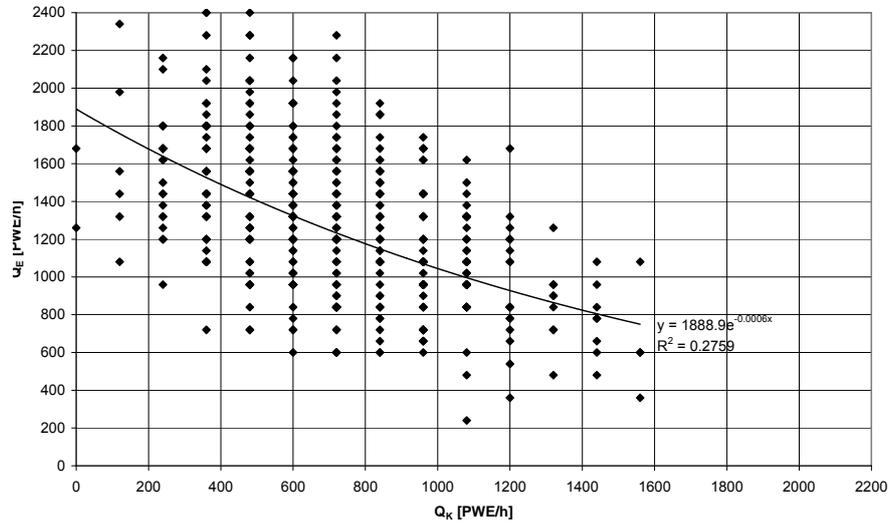
Gruppe 2: Aussendurchmesser 40 – 49 m (10 Kreiselarme)



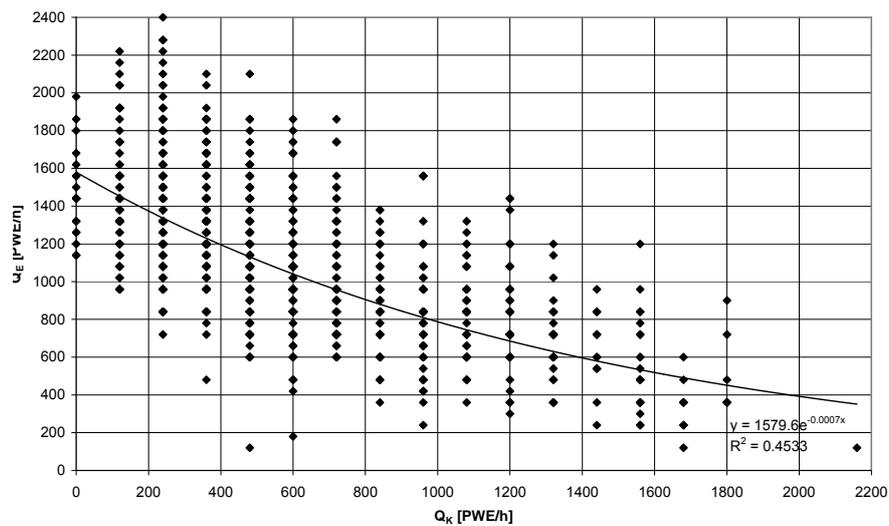
Gruppe 3: Aussendurchmesser 50 – 60 m (8 Kreiselarme)

IV.2 Einfluss der Fahrstreifensignalisation auf die Leistungsfähigkeit

Gruppe 1: Keine Markierungen oder Signale (4 Kreiselarme)

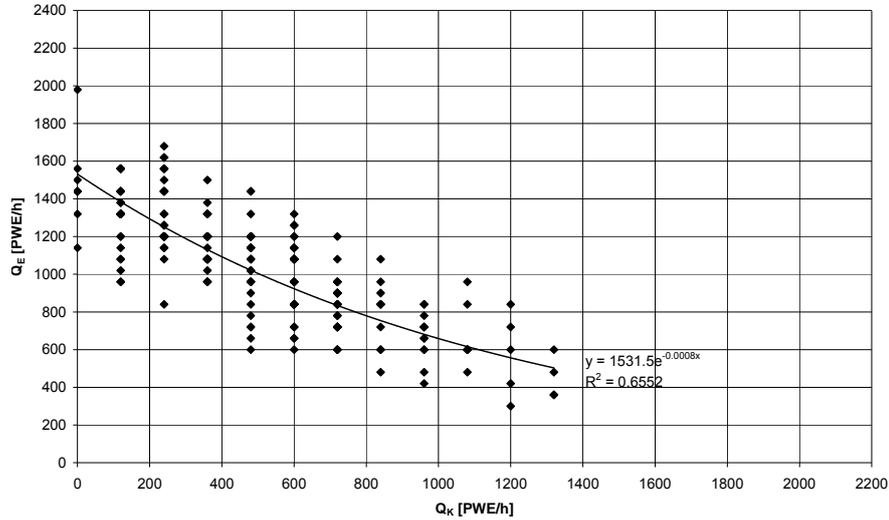


Gruppe 2: Mit Markierungen und/oder Signalen (12 Kreiselarme)

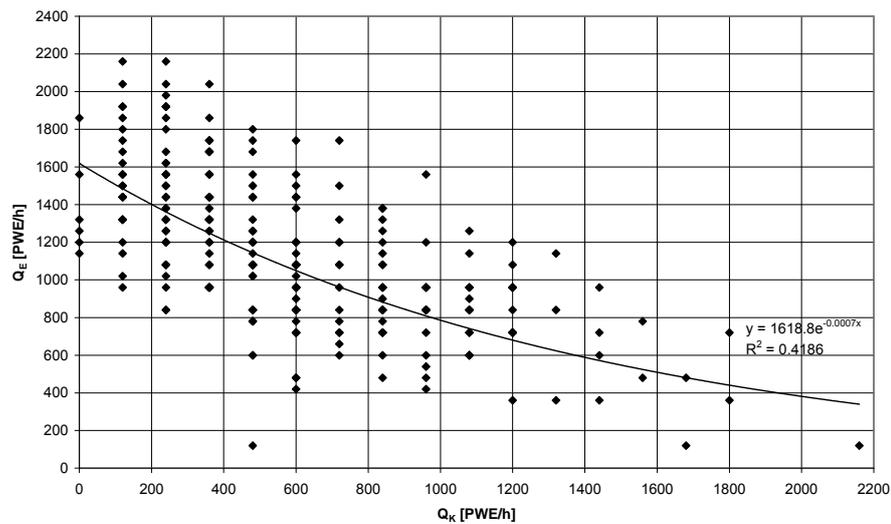


IV.3 Einfluss der Verteilung in der Einfahrt auf die Leistungsfähigkeit

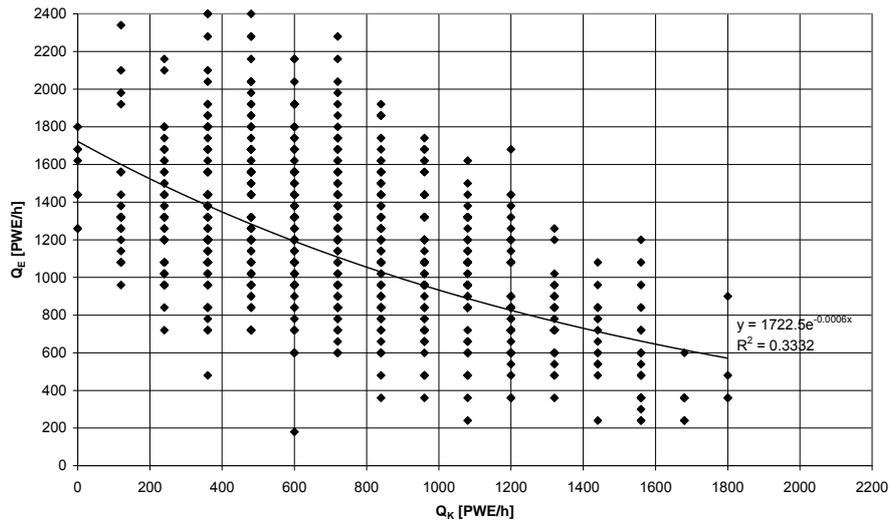
Gruppe 1: Anteil Verkehrsbelastung li. FS < 20 % (2 Kreiselarme)



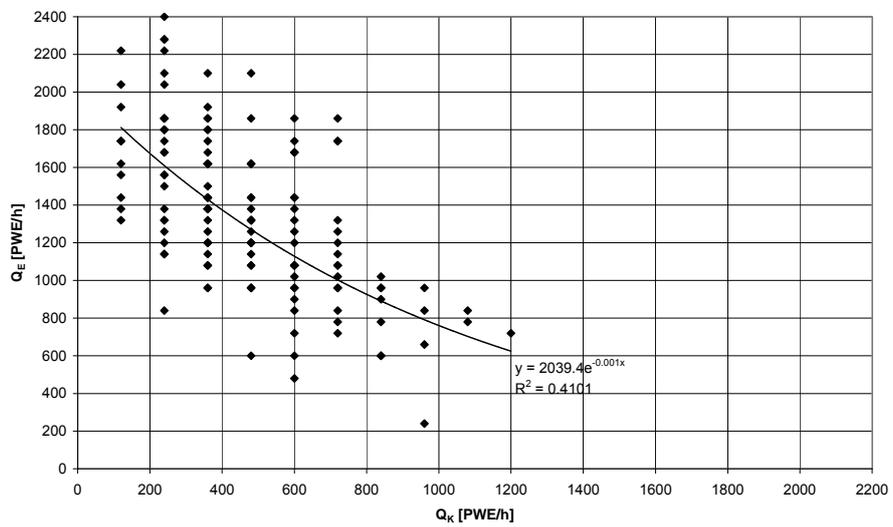
Gruppe 2: Anteil Verkehrsbelastung li. FS 20 – 40 % (5 Kreiselarme)



Gruppe 3: Anteil Verkehrsbelastung li. FS 40 – 60 % (7 Kreiselarme)

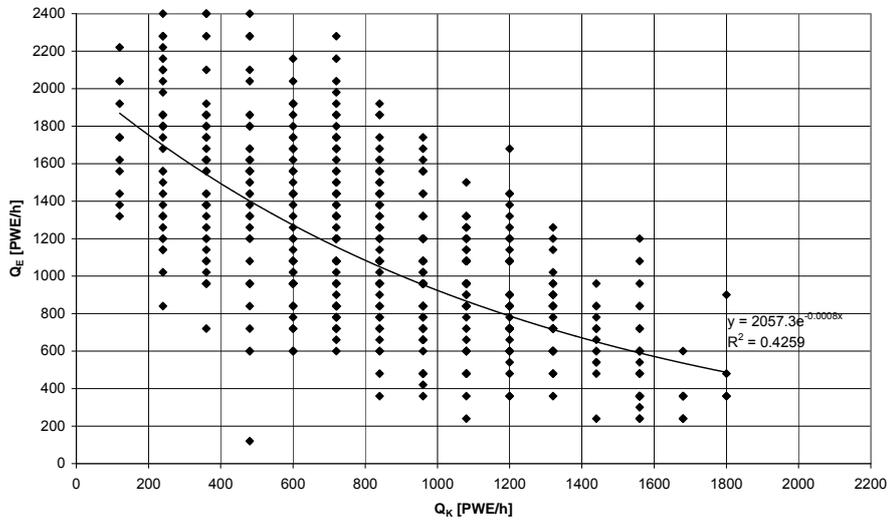


Gruppe 4: Anteil Verkehrsbelastung li. FS > 60 % (2 Kreiselarme)

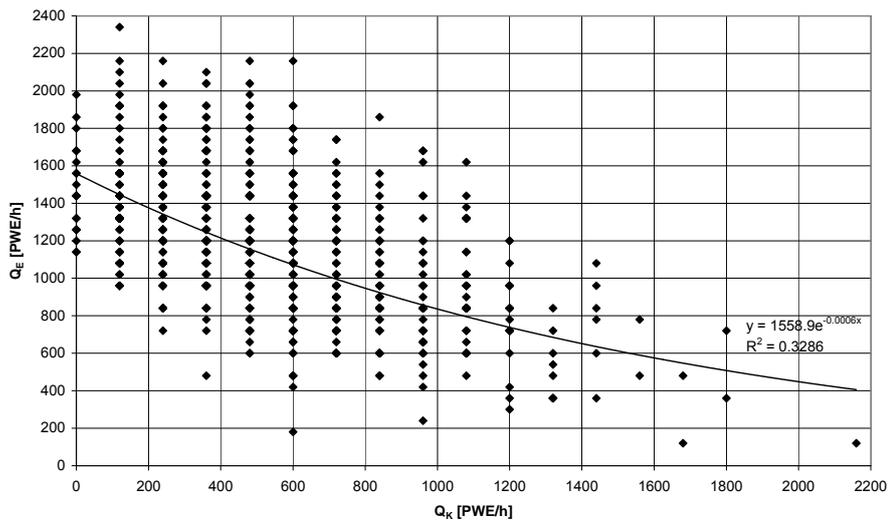


IV.4 Einfluss eines Bypasses auf die Leistungsfähigkeit

Gruppe 1: Bypass in der voranliegenden Einfahrt vorhanden (5 Kreiselarme)

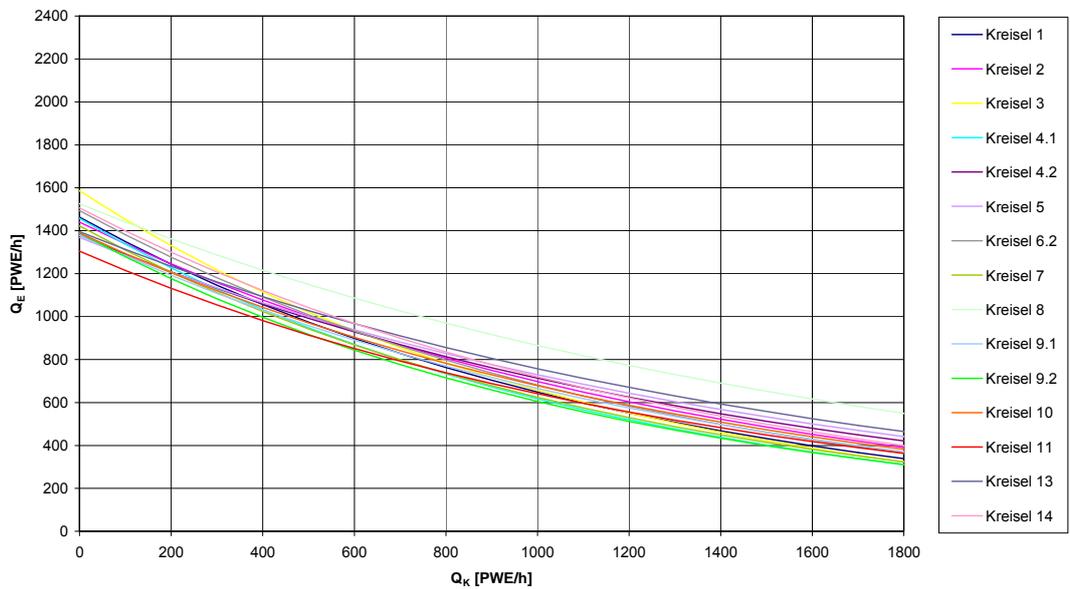


Gruppe 2: Kein Bypass in der voranliegenden Einfahrt vorhanden (11 Kreiselarme)



V Streuung der Leistungsfähigkeit der Einzelkreisel mit dem Zeitlückenverfahren

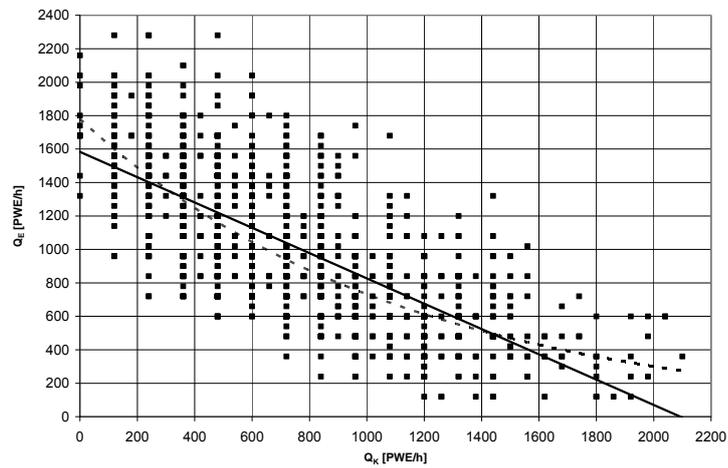
Streuung der Leistungsfähigkeit der Einzelkreisel am Beispiel mit Formel nach Siegloch



VI Übersicht Daten Deutschland

Ort	Kreisel	Arm	D [m]
Singen	Georg-Fischerstr. / Industriestr. / Fittingerstr.	Nord	45
		Ost	
		West	
Brühl	Eisenwerk	Nord	50
		West	
Würselen	B57 / L223	Nord	50
		Ost	
		Süd	
Rosenheim	Äussere Münchener Strasse / Hohenhofer Strasse	Ost	56
		Süd	
		West	

Regression Daten Deutschland (alle Intervalle)



— Lineare Trendlinie

$$y = 1582.8 - 0.7563x$$

$$R^2 = 0.5101$$

---- Exponentielle Trendlinie

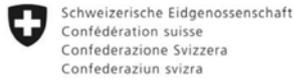
$$y = 1779.7 \cdot e^{0.0009x}$$

$$R^2 = 0.5275$$

Literaturverzeichnis

- | | |
|------|--|
| [1] | Schweizer Norm SN 640 024a, Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit, Knoten mit Kreisverkehr, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich, 2006 |
| [2] | Lindenmann, H.P., Belopitov, I., Spacek, P., Leistungsfähigkeit hochbelasteter Kreisel (Grundlagen), Forschungsauftrag VSS 1998/076, IVT ETH Zürich, August 2004 |
| [3] | Lendrova, I., Capacity of Multi-lane Roundabouts, Master Thesis, IVT ETH Zurich, Zurich, 2009 |
| [4] | Schauwecker, M., Untersuchung zur Leistungsfähigkeit von Kreisverkehren mit zweistreifigen Kreisfahrbahnen, Projektarbeit, IVT ETH Zürich, Zürich, 2009 |
| [5] | Simon, M., Hintermeister, O., Lehmann, U., Empirische Ermittlung der Leistungsfähigkeit von innerörtlichen Kreisverkehrsplätzen, VSS Forschungsauftrag 3/89, Emch + Berger, Aarau / Zürich, November 1990 |
| [6] | Brilon, W., Bondzio, L., Wu, N., Neue Forschungsergebnisse zur Kapazität von Kreisverkehrsplätzen, Strassenverkehrstechnik Heft 9, 1997 |
| [7] | Brilon, W., Bäumer, H., Überprüfung von Kreisverkehren mit zweistreifig markierter oder einstreifig markierter, aber zweistreifig befahrbarer Kreisfahrbahn, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, 876, Bonn, Januar 2004 |
| [8] | FGSV, Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen HBS, Köln, 2001 |
| [9] | FGSV, Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehrsplätzen, Köln, 2006 |
| [10] | Brilon, W., Wu, N., Knotenpunkte: Kapazität von Kreisverkehren – Aktualisierung, Strassenverkehrstechnik Heft 5, 2008 |
| [11] | Stuwe, B., Untersuchung der Leistungsfähigkeit an deutschen Kreisverkehrsplätzen, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, 1992 |
| [12] | Brilon, W., Bäumer, H., Kompakte zweistreifig befahrbare Kreisverkehre, Strassenverkehrstechnik 7.2004 |
| [13] | Huber, C.A., Bühlmann, F., Sicherheit von Kreiselanlagen, Erfahrungen und vorläufige Empfehlungen, Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung bfu, Bern, Dezember 1994 |
| [14] | Bühlmann, F., Spacek, P., Unfallgeschehen und Geometrie der Kreiselanlagen, VSS Forschungsauftrag 17/93, Zürich, März 1997 |
| [15] | Lindenmann, H.P., Unfallgeschehen einstreifiger Kreisel und Kreisel mit überbreiter Kreisfahrbahn mit zweistreifigen Einfahrten (unveröffentlicht) |
| [16] | Schweizer Norm SN 640 263, Knoten, Knoten mit Kreisverkehr, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich, 2000 |
| [17] | Matthews, W., Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr, Forschungsauftrag VSS 2000/343, PTV SWISS AG, 2009 |
| [18] | Siegloch, W., Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagensteuerung., Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 154, Bonn 1973 |
| [19] | Schweizer Norm SN 640 009a, Strassenverkehrsunfälle, Lokalisierung und Rangierung von Unfallschwerpunkten, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich, 2005 |
| [20] | Brilon, W., Geppert, A., Verkehrsqualität an zweistreifigen Kreisverkehren unter Berücksichtigung der Abbiegebeziehungen und aktueller Grenz- und Folgezeitlücken, 2. Zwischenbericht, Ruhr-Universität Bochum, Juli 2008 (unveröffentlicht) |
| [21] | Wu, N., Eine universelle Formel für die Berechnung der Kapazität von Kreisverkehren, Arbeitsblätter des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, Heft Nr. 13, 1997 |
| [22] | Troutbeck, R.J., Estimating the Critical Acceptance Gap from Traffic Movements, Research Report 92-5, Queensland University of Technology, Brisbane, 1992 |
| [23] | Schweizer Norm SN 640 010, Strassenverkehrsunfälle, Unfallanalysen sowie Kurz-, Gefahren- und Risikoanalysen, Verband der Schweizer Strassenfachleute VSS, Zürich, 2001 |
| [24] | BFS Bundesamt für Statistik, Strassenverkehrsunfälle, Instruktionen, Bern, 1990 |

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

ARAMIS SBT

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am:

Grunddaten

Projekt-Nr.:

Projekttitel:

Enddatum:

Texte:

Zusammenfassung der
Projektresultate:

Der abgeschlossene Forschungsauftrag führte zu folgendem neuen Bemessungszusammenhang für zweistreifige Kreisel (Typ 2/2):

$$Q_E = 1639,9e^{-0,0006 \cdot Q_K}$$

Die Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit zeigen, dass zweistreifige Einfahrten bei kleineren Verkehrsmengen auf der Kreisfahrbahn im Mittel eine um ca. 25 % höhere und bei mittleren und höheren Verkehrsbelastungen auf der Kreisfahrbahn eine um ca. 30 % höhere Leistungsfähigkeit im Vergleich mit einstreifigen Einfahrten haben. Bei mittleren und höheren Verkehrsbelastungen auf der Kreisfahrbahn entspricht dies absolut etwa 300 PWE/h. Vorteilhaft erweist sich dabei, dass auch bei hoher Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn deutlich mehr Fahrzeuge einfahren können als bei einstreifigen Kreiseln. Zwischen den Betriebsformen 2/1+ und 2/2 bestehen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der Einfahrten ohne Berücksichtigung des Einflusses querender Fussgänger praktisch keine Unterschiede.

Die Untersuchung zum Unfallgeschehen zweistreifiger Kreisel führt zur Erkenntnis, dass das Sicherheitsniveau zweistreifiger Kreisel etwa gleich ist wie jenes einstreifiger Kreisel. Zwar ereignen sich an zweistreifigen Kreiseln absolut mehr Unfälle als an einstreifigen Kreiseln, die Unfallziffer, d.h. die Zahl der Unfälle bezogen auf die im Kreisel erbrachte Verkehrsleistung, ist aber beinahe gleich. Zwischen den einzelnen zweistreifigen Kreiseln zeigen sich jedoch relativ grosse Unterschiede des Sicherheitsniveaus.



Aus diesem Grund muss eine Anordnung eines zweistreifigen Kreisels sorgfältig überlegt und insbesondere aufgrund einer Leistungsanalyse für jede einzelne Einfahrt beurteilt werden.

Zielerreichung:

Die im Forschungsgesuch festgelegten Ziele, welche durch konkrete Fragen umschrieben wurden, konnten vollumfänglich erreicht werden. Einerseits liegt der gesuchte neue Bemessungszusammenhang bzgl. Leistungsfähigkeit der zweistreifigen Einfahrten in Abhängigkeit der Verkehrstärke auf der zweistreifigen Kreisfahrbahn vor. Dabei konnte auch erklärt werden, dass bei einer ungefähr gleichmässigen Auslastung der beiden Fahrstreifen der Einfahrt, die höhere Gesamtleistung der Einfahrt erreicht wird. Andererseits konnte – entgegen den Vermutungen von Fachleuten aus der Praxis – nachgewiesen werden dass zweistreifige Kreisel bei Aussendurchmessern von 35 – 45 m ein etwa gleiches Sicherheitsniveau wie einstreifige Kreisel aufweisen.

Folgerungen und Empfehlungen:

Einsatzbereich und Gestaltung

Generell sollte bei der Wahl der Betriebsform folgendes beachtet werden:

- Die Anwendung zweistreifiger Kreisel soll dann geprüft werden, wenn dies aus Leistungsgründen als zweckmässig beurteilt werden kann.
- Bei begrenzten Platzverhältnissen ist die Anwendung der Betriebsform 2/1+, also statt zweistreifig markierter, die einstreifig überbreit ausgebildete Kreisfahrbahn zu prüfen. Deren zweckmässiger Einsatz liegt bei Aussendurchmessern von ca. 30 bis 40 m.
- Der Einsatz der zweistreifig markierten Kreisel ist erst ab einem Aussendurchmesser von 35 m angezeigt. Zweistreifige Kreisel mit Aussendurchmessern grösser als 50 m führen bei mittleren und hohen Verkehrsmengen auf der Kreisfahrbahn zu keiner Leistungssteigerung in den Einfahrten.

Die betriebliche und geometrische Ausgestaltung zweistreifiger Kreisel ist sorgfältig zu planen. Es sind dabei folgende Grundsätze zu berücksichtigen:

- Bei zweistreifig markierten Kreisel sind zweistreifige Einfahrten nur dort anzuordnen, wo dies aus Leistungs- und Verkehrsqualitätsgründen (Rückstau) erforderlich ist. Wo dies nicht nötig ist, ist aus Gründen der Verkehrssicherheit einer einstreifigen Einfahrt den Vorzug zu geben.
- Bei der Anordnung von Fahrstreifensignalisationen und –markierungen in zweistreifigen Zufahrten ist Zurückhaltung angezeigt. Wie die vorliegende Untersuchung ergab, lässt sich damit die Fahrstreifenbelastung des linken Fahrstreifens nicht in jedem Fall verbessern.
- Die Leistungsfähigkeit gemäss dem Bemessungszusammenhang wird bei ungefähr gleichmässiger Belastung der beiden Fahrstreifen in der Einfahrt (50 % ± 10 %) erreicht. Bei deutlicheren Unterschieden der Belastungen der Fahrstreifen lässt sich die angegebene Leistungsfähigkeit nicht erreichen.
- Die Ausfahrten aus zweistreifigen Kreiseln sind aus Verkehrssicherheitsgründen einstreifig zu gestalten.

Normung

Für die Normbearbeitung wird folgendes empfohlen:

- Zur Ergänzung der Norm SN 640 024a kann der in der vorliegenden Forschungsarbeit hergeleitete Bemessungszusammenhang für Kreiseltyp 2/2 aufgenommen werden.

$$\text{Kreiseltyp 2/2: } Q_E = 1639.9e^{-0.0006 Q_K} \quad (\text{ohne FG})$$

- Zur Vereinheitlichung wird vorgeschlagen, die Bemessungszusammenhänge für alle Kreiseltypen in exponentieller Form darzustellen. Für Kreiseltyp 1/1 sowie 2/1+ können folgende Formeln verwendet werden:

$$\text{Kreiseltyp 1/1: } Q_E = 1203.7 \cdot e^{-0.0007 Q_K} \quad (\text{ohne FG})$$

$$\text{Kreiseltyp 2/1+: } Q_E = 1607.5 \cdot e^{-0.0006 Q_K} \quad (\text{ohne FG})$$

- Es wird empfohlen in der Norm für die Kreiseltypen 2/2 und 2/1+ einen gemeinsamen Bemessungszusammenhang anzugeben, da die Kurven fast identisch sind. Dabei ist anzumerken, dass bei Betriebsform 2/1+ auch der Einfluss der Fussgänger zu beachten ist.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

- Bezüglich Erreichung der Leistungsfähigkeit gemäss dem Bemessungszusammenhang sind ungefähr gleiche Fahrstreifenbelastungen in der Einfahrt ($50\% \pm 10\%$) Voraussetzung. Bei ungleichmässiger Belastung (20% – 30% auf dem linken Fahrstreifen) ergeben sich im Bereich von mittleren bis grossen Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn um ca. 100 bis 150 PWE/h reduzierte Leistungsfähigkeiten.
- Für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Ausfahrten in einstreifiger Ausbildung kann der Richtwert von 1700 PWE/h (ohne Fussgängereinfluss) verwendet werden.

Weiterer Forschungsbedarf

Wesentlichere Fragen sind im Bereich der Verkehrssicherheit bei Kreiseln noch vorhanden. Einerseits besteht hinsichtlich der grossen Differenzen der Unfalzziffer zwischen den einzelnen Kreiseln Klärungsbedarf, andererseits bestehen noch offene Fragen zu erkannten Auffälligkeiten im Unfallgeschehen. Zur Abklärung der Ursachen sollten gezielt Unfallanalysen zu folgenden Punkten durchgeführt werden:

- Häufigkeit und Schwere der Unfälle auf der Kreisfahrbahn.
- Häufigkeit und Schwere der Auffahrunfälle in den Zu- und Einfahrtbereichen zu zweistreifigen Kreiseln
- Häufigkeit und Schwere der Schleuder-/Selbstunfälle in Kreiselausfahrten zweistreifiger Kreisel.

Publikationen:

Lindenmann H.P., Spacek P., Brilon W., Leemann N., Belopitov I., Shojaati M., Geppert A. (2009) Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel. Schlussbericht VSS 2005/301, Schriftreihe, Nr. noch offen, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern



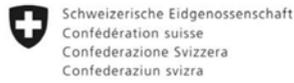
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Beurteilung der Begleitkommission:

Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.

<p>Beurteilung:</p>	<p>Mit den vorliegenden Resultaten des Forschungsprojektes „Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel“ haben die Forschungsstellen die im Rahmen der Zielsetzung gestellten konkreten Fragen der Leistungsfähigkeit und der Verkehrssicherheit zweistreifiger Kreisel sowie Vergleiche zu einstreifigen Kreiseln beantworten können. Einerseits liegt ein neuer Bemessungszusammenhang für zweistreifige Einfahrten bei zweistreifigen Kreiselfahrbahnen vor. Andererseits liess sich auch die Frage des Einflusses der Verteilung der Verkehrsmenge auf die beiden Fahrstreifen der Einfahrt auf die Gesamtleistungsfähigkeit der zweistreifigen Einfahrt quantifiziert aufzeigen, was für die Beurteilung von Fahrstreifensignalisationen in der Praxis von wesentlicher Bedeutung ist. Obgleich festgestellter grosser Streuungen erscheint der zweistreifige Kreisel im Durchschnitt etwa gleich sicher wie der einstreifige Kreisel. Aufgrund der grossen Streuung wird jedoch die Empfehlung zur sorgfältigen Prüfung der Notwendigkeit aus Leistungsgründen und eine entsprechende Ausgestaltung im Einzelfall bestätigt und unterstützt.</p> <p>Die Erarbeitung der Ergebnisse ist vollumfänglich nachvollziehbar und sorgfältig dokumentiert. Die Folgerungen basieren streng auf den Erkenntnissen der Untersuchung. Die Empfehlungen können unterstützt werden.</p>
<p>Umsetzung:</p>	<p>Der neue Bemessungszusammenhang lässt sich unmittelbar für die Planung von Kreiseln in der Praxis unter Beachtung der zugehörigen Empfehlungen verwenden.</p> <p>Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Ergänzung und Erweiterung der Norm SN 640 024a „Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit; Knoten mit Kreisverkehr“ und können direkt und rasch umgesetzt werden.</p>
<p>weitergehender Forschungsbedarf:</p>	<p>Die Wissenslücken im Bereich der Leistungsfähigkeit von Kreiseln konnten mit der Forschungsarbeit grösstenteils geschlossen werden.</p> <p>Wesentliche Fragen sind hingegen im Bereich der Verkehrssicherheit bei Kreiseln noch vorhanden. Einerseits besteht hinsichtlich der grossen Differenzen der Unfallziffer zwischen den einzelnen Kreiseln Klärungsbedarf, andererseits bestehen noch offene Fragen zu erkannten Auffälligkeiten im Unfallgeschehen. Zur Abklärung der Ursachen müssten allerdings gezielte Unfallanalysen durchgeführt werden.</p>
<p>Einfluss auf Normenwerk:</p>	<p>Die Forschungsarbeit wurde gezielt auf die notwendige Vervollständigung der Norm zur Leistungsfähigkeit von Kreiseln (SN 640 024a) (FK3) beantragt resp. ausgerichtet. Mit dem neuen Bemessungszusammenhang für die zweistreifigen Kreisel kann die Norm direkt und umgehend ergänzt und die vorhandene Lücke geschlossen werden. Zusätzlich lassen sich die weiteren Erkenntnisse der Forschungsarbeit zum Teil in dieser Norm und zum anderen Teil auch für die Normung bei SN 640 263, Knoten mit Kreisverkehr (FK2) verwenden. Schliesslich können die Ergebnisse zur Verkehrssicherheit, insbesondere die durchschnittliche Unfallziffer, direkt in die laufende Normung SN 641 714, Sicherheitsniveaus von Strassenverkehrsanlagen (EK 3.04) einbezogen werden. Damit hat die Forschungsarbeit einige konkrete und direkte Auswirkungen auf die VSS-Normung.</p>



Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Präsident Begleitkommission:

Name:	<input type="text" value="Koy"/>	Vorname:	<input type="text" value="Thorsten"/>
Amt, Firma, Institut:	<input type="text" value="Rapp Trans AG"/>		
Strasse, Nr.:	<input type="text" value="Hochstrasse 100"/>		
PLZ:	<input type="text" value="4018"/>	Email:	<input type="text" value="thorsten.koy@rapp.ch"/>
Ort:	<input type="text" value="Basel"/>	Telefon:	<input type="text" value="061 335 78 27"/>
Kanton, Land:	<input type="text" value="Basel-Stadt, Schweiz"/>	Fax:	<input type="text" value="061 335 77 00"/>

Unterschrift Präsident Begleitkommission:

Thorsten Koy FK3 Make 3.12.09

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt-Nr.	Titel	Datum
1227	VSS 2004/601	Umweltbauabnahme (UBA) <i>Réception environnementale des travaux (RET)</i>	2008
1228	SVI 2001/508	Mobilitätsmuster zukünftiger Rentnerinnen und Rentner – eine Herausforderung für das Verkehrssystem 2030? <i>Mobilité des futurs retraités – un défi pour le système des transport en 2030?</i>	2008
1229	SVI 2004/081	Modal Split Funktionen im Güterverkehr <i>Fonctions de répartition modale pour le trafic de marchandises</i>	2008
1230	SVI 2004/090	Monitoring und Controlling des Gesamtverkehrs in Agglomerationen <i>Monitoring et controlling de l'ensemble du trafic dans les agglomérations</i>	2008
1231	SVI 2004/045	Mobilitätsmanagement in Betrieben – Motive und Wirksamkeit <i>Gestion de la mobilité dans les entreprises – motifs et efficacité</i>	2008
1232	ASTRA 2005/008	Low Power Wireless Sensor Network for Monitoring Civil Infrastructure <i>Drahtloses Sensornetzwerk zur Infrastrukturüberwachung</i>	2009
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten <i>Components durables des couches bitumineux</i>	2009
1235	VSS 2004/711	Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen Standardisierte Erhaltungsmaßnahmen <i>Mesures d'entretiens standardisées</i>	2008
1236	ASTRA 2008/008_7	Analytische Gegenüberstellung der Strategie- und Tätigkeitsschwerpunkte ASTRA-AIPCR <i>Analyse Comparative des accents stratégiques et des champs d'action prioritaires de l'OFROU et de l'AIPCR</i>	2008
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz <i>Bases pour eCall en Suisse</i>	2009
1238	VSS 2005/303	Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich von Hochleistungsstrassen <i>Sécurité routière pour chantiers de courte durée et aux jonctions dans la zone d'un chantier de route à grand débit</i>	2008
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen <i>Bases de dimensionnement pour le renforcement par géosynthétiques</i>	2009

Bericht-Nr.	Projekt-Nr.	Titel	Datum
1240	ASTRA 2002/010 & 2005/009	L'acceptabilité du péage de congestion: Résultats et analyse de l'enquête réalisée en Suisse <i>Die Akzeptanz von Gebühren zur Vermeidung von Stau auf Strassen: Resultate und Analysen von Untersuchungen in der Schweiz</i>	2009
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests <i>Amélioration des informations fournies par l'essai d'orniérage LCPC</i>	2009
1242	VSS 2005/451	Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: Initialprojekt <i>Recyclage des matériaux bitumeux de démolition dans les enrobés à chaud: projet initial</i>	2007
1243	VSS 2000/463	Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassenanlagen <i>Les coûts de l'entretien courant des routes</i>	2008
1244	VSS 2004/714	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen <i>Bénéfice total - rapport avantages / coûts des mesures d'entretien standardisées</i>	2008
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert <i>Influences et interactions de l'état de surface et de la portance sur la valeur intrinsèque et la valeur d'usage</i>	2009
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen <i>Exigences à l'équipement routier pour l'utilisation de la bande d'arrêt d'urgence</i>	2009
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen <i>Facteurs d'influence sur la résistance au feu de structures en béton</i>	2009
1250	VSS 2005/502	Strassenabwasser Filterschacht <i>Traitement des eaux de routes dans des chambres avec sac en géotextile</i>	2007
1251	VSS 2002/405	Incidence des granulats arrondis ou partiellement arrondis sur les propriétés d'adhérence des bétons bitumeux <i>Auswirkung der gerundeten oder teilweise gerundeten Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit des Asphaltbetons</i>	2008