



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT**

Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze
Fachgebiet Verkehrsplanung
und Verkehrstechnik

Petersenstraße 30
64287 Darmstadt
Telefon: (+49 6151) 16-20 25
Telefax: (+49 6151) 16-46 25

Ermittlung von Detektorstandorten für den Straßenverkehr innerorts

vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Christine Lotz
aus Frankfurt am Main**

Darmstadt im Mai 2002

D17

Referent: Univ. Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze

Korreferent: Univ. Prof. Dr./UCB Hartmut Keller

Tag der Einreichung: 12.12.2001

Tag der mündlichen Prüfung: 02.05.2002

D17

Dank

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Verkehr, Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, sowie am Zentrum für integrierte Verkehrssysteme an der Technischen Universität Darmstadt.

Mein Dank gilt meinen akademischen Lehrern Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Hans-Georg Retzko und seinem Nachfolger Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze für alle Möglichkeiten, die sie mir als ihre Schülerin eröffnet haben sowie für die wertvollen Anregungen und Diskussionen. Herrn Prof. Boltze danke ich insbesondere für die Übernahme des Referats.

Herrn Prof. Dr./UCB Hartmut Keller danke ich für die Übernahme des Korreferats und die konstruktiven Vorschläge und Hilfestellungen.

Herrn Dr. Klaus Nökel und Herrn Dr. Markus Friedrich von der PTV AG danke ich für die Bereitstellung von VISUM sowie für die tatkräftige Unterstützung bei der Anwendung.

Meinen ehemaligen Kollegen am Institut für Verkehr und am Zentrum für integrierte Verkehrssysteme danke ich für die freundschaftliche Zusammenarbeit.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich jederzeit unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	7
2. Vorgehensweise	10
2.1 Begriffliche Definitionen	10
2.2 Anforderungen	11
2.3 Untersuchungsmethode.....	12
2.4 Bewertungsebenen und Bewertungskriterien	14
2.4.1 Vergleichende Bewertung der Verfahren	15
2.4.2 Bewertung eines Detektorsatzes.....	15
2.4.3 Bewertung eines einzelnen Detektors.....	17
2.5 Integration existierender Verfahren.....	17
2.5.1 Anforderungen	17
2.5.2 Routensuch- und Umlegungsverfahren.....	18
2.5.3 Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren	20
2.5.4 Analyse der Funktionsweise und Funktionsfähigkeit.....	24
3. Bisherige Arbeiten	29
4. Entwicklung eigener Auswahlverfahren	39
4.1 Analyse der Permutationen und Kombinationen.....	39
4.2 Einteilung der Auswahlverfahren	40
4.3 Definition von Indikatoren	42
4.4 Verfahren basierend auf der Bewertung einzelner Detektoren ohne Einbeziehung des Schätzergebnisses	45
4.5 Verfahren basierend auf der Bewertung eines Detektorsatzes ohne Einbeziehung des Schätzergebnisses	49
4.6 Verfahren basierend auf der Bewertung mit Einbeziehung des Schätzergebnisses	55
5. Aufbau einer Bewertungsumgebung	59
5.1 Beschreibung des Testgebiets	59
5.1.1 Auswahlkriterien	59
5.1.2 Lage im Raum.....	59
5.1.3 Vorhandene Datenbasis.....	59
5.1.4 Definition des strategischen Netzes	60
5.1.5 Bestimmung der zu untersuchenden Quelle-Ziel-Matrizen....	63
5.2 Versuchsplan	64
5.2.1 Abhängigkeiten und Randbedingungen bei der Definition der Detektorsätze	64
5.2.2 Versuchsaufbau zur vergleichenden Bewertung der Kriterien Anzahl der Detektoren und Abweichung der Matrix	64

5.2.3 Versuchsaufbau zur Überprüfung des Einflusses der Routensuch- und Umlegungsverfahren.....	65
5.2.4 Versuchsaufbau zur Überprüfung des Einflusses der Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren	67
5.2.5 Versuchsaufbau zur Überprüfung des Einflusses der Soll-Matrizen	67
5.3 Entwicklung eines Programms zur Durchführung des Versuchsplans	69
5.3.1 Aufgabe des Programms ODeFIX.....	69
5.3.2 Systemvoraussetzungen und eingesetzte Software.....	70
6. Bewertung der Auswahlverfahren	71
6.1 Bewertung der ermittelten Anzahl der Detektoren	71
6.2 Bewertung der Abweichung der geschätzten Quelle-Ziel-Matrix ...	72
6.3 Bewertung der Robustheit gegenüber Änderungen der Randbedingungen	74
6.3.1 Gewichtung der Randbedingungen.....	74
6.3.2 Einfluss der eingesetzten Routensuch- und Umlegungsverfahren	75
6.3.3 Einfluss der eingesetzten Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren	78
6.3.4 Einfluss der zugrunde gelegten Quelle-Ziel-Matrizen.....	80
6.3.5 Robustheit des Konstruktionsverfahrens.....	82
6.4 Theoretischer Vergleich mit Verfahren aus der Literatur	83
6.5 Zusammenfassende Bewertung und Einsatzempfehlung.....	85
6.5.1 Besten-Bewertung.....	86
6.5.2 Reihen-Bewertung	86
6.5.3 OD-Elimination	87
6.5.4 Routen-Elimination.....	87
6.5.5 Konstruktionsverfahren	88
7. Validierung des ermittelten optimalen Detektorsatzes für das Testgebiet.....	91
7.1 Einsatz weiterer theoretischer Matrizen.....	91
7.2 Vergleich mit von ortskundigen Experten definierten Detektorsätzen	94
8. Übertragbarkeit der Ergebnisse	98
8.1 Beurteilung der Datengrundlage und der Annahmen	98
8.2 Beurteilung des praktischen Einsatzes	99
9. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	101
10. Ausblick.....	105

1. Einleitung

Im operativen Verkehrsmanagement werden immer häufiger auf Quelle-Ziel-Matrizen basierende Verfahren und Modelle eingesetzt. Dazu zählen in jüngster Zeit vor allem mikroskopische Verkehrssimulationen, die auf der Grundlage einer Quelle-Ziel-Matrix und unter Einsatz eines Routensuch- und Umlegungsverfahrens die Verkehrslage in verschiedenen Situationen abbilden können.

Wesentliche Entwicklungen in diesem Bereich werden in den Ballungsraum-Projekten **WayFlow**¹ (im Rhein-Main-Gebiet) und **MOBINET**² (im Großraum München) vorangetrieben. Für die Anwendungsfelder der Verkehrsinformation und Verkehrssteuerung werden Systeme aufgebaut, die mit der Hilfe von aktuell geschätzten Quelle-Ziel-Matrizen Verkehrsqualitäten (Level of Service LOS), Reisezeiten usw. ermitteln. Beispiel hierfür ist das für München entwickelte System **DINOonline (Logi, F./ Ullrich, M./ Keller, H. (2001))**, bei dem aktuelle lokale Verkehrserfassung und Floating Car Data (FCD) für die Ermittlung von Parametern der Verkehrslage integriert sollen. Für Entwicklungen in diesem Bereich ist die Frage nach der minimal erforderlichen Verkehrserfassung ein wichtiges zu diskutierendes Problem.

In den Planungsabteilungen der verantwortlichen Ämter liegen in der Regel aus Verkehrserzeugungsmodellen stammende Quelle-Ziel-Matrizen vor. Diese wurden jedoch häufig auf der Grundlage älterer Befragungen hergeleitet und genügen selten dem Anspruch der Aktualität, der durch das Verkehrsmanagement gestellt wird. Die vorhandenen Quelle-Ziel-Matrizen sind dementsprechend für den operativen Einsatz an die jeweilige Verkehrslage anzupassen, um strategische Maßnahmen in der aktuellen Verkehrsbelastungssituation verlässlich testen zu können.

Dazu werden Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren eingesetzt, die anhand von Querschnittsbelastungen die aktuellen Quelle-Ziel-Belastungen schätzen. Aus der Forschung existieren verschiedene Ansätze,

¹ Informationen unter www.wayflow.de

² Informationen unter www.mobinet.de

die sich dieser Problemstellung annehmen, und auf denen die vorliegende Arbeit aufbaut.

Die Anzahl und Lage der Erfassungsquerschnitte ist bei allen Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren von entscheidender Bedeutung. Aus wirtschaftlichen Gründen ist die Anzahl der Detektoren so gering wie möglich zu halten, für eine bestmögliche Qualität der zu schätzenden Quelle-Ziel-Matrix sind jedoch so viel Informationen wie möglich zu sammeln.

Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, Verfahren zu entwickeln und vergleichend zu bewerten, mit denen die optimale Anzahl und Lage von Detektoren bestimmt werden kann, die für eine Anpassung der Anzahl der Fahrten einer vorhandenen, aus der Verkehrsplanung stammenden Quelle-Ziel-Matrix an die aktuelle Verkehrslage mindestens erforderlich sind.

Konzentration auf die stationäre Erfassung

Stationäre Detektoren werden auch in den kommenden Jahren die wichtigste Grundlage für die Verkehrslageerfassung bilden. Alternative Verfahren, vor allem auf der Basis von Floating Car Data (FCD), können ergänzend zur Qualitätsverbesserung hinzugezogen werden. Dies gilt auch für Daten aus rechnergestützten Betriebsleitsystemen des öffentlichen Verkehrs. Sie werden jedoch nicht flächendeckend die stationäre Erfassung ersetzen können.

Die Fusion von Daten aus stationärer Erfassung und FCD und deren Auswirkung auf die Anzahl und Lage der erforderlichen stationären Detektoren wird hier nicht behandelt.

Anzahl der Fahrzeuge als wichtigste Erfassungsgröße

Für die Anpassung von Quelle-Ziel-Matrizen anhand von Querschnittsmessungen wird hier die Anzahl der Fahrzeuge in den einzelnen Netzelementen als wichtigste erfassbare Verkehrskenngröße angenommen. Strombelastungen können im Modell in Form von virtuellen Abbiegeverbindungen berücksichtigt werden. Alle weiteren Verkehrs-

kenngrößen bleiben für die Bewertung der Detektorstandorte hier unberücksichtigt.

Untersuchungsschwerpunkt Nachfrageerfassung

Veränderungen von Detektorwerten können grundsätzlich drei Ursachen haben:

- Großräumige und zeitliche Nachfrageveränderungen, die sich in einer Veränderung der Quelle-Ziel-Matrix widerspiegeln.
- Lokale Störungen, die sich auf den Verkehrsfluss in einem Netzelement oder in mehreren Netzelementen auswirken.
- Änderungen in der Verkehrssteuerung, die sich auf den Verkehrsfluss in einem Netzelement oder in mehreren Netzelementen auswirken.

Aus jeder dieser Ursachen lassen sich Anforderungen an die Datenerfassung formulieren, die zu unterschiedlichen Detektorsätzen führen können. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Erfassung von Verkehrsnachfrageveränderungen.

Dabei wird davon ausgegangen, dass die Detektoren kein fehlerhaftes Datum liefern und dass diese fehlerfrei verarbeitet werden.

2. Vorgehensweise

2.1 Begriffliche Definitionen

Das untersuchte Straßennetz wird durch einen Graphen mit Knoten und Kanten repräsentiert. Der Begriff **Detektor** wird in der Arbeit synonym für permanente Verkehrserfassungsstellen verwendet. Detektorstandorte entsprechen den Kanten zwischen zwei Knoten. Die technische Spezifikation von Detektoren, beispielsweise ob es sich um Induktionsschleifen oder Videokameras handelt, ist nicht Gegenstand der Arbeit. Vorausgesetztes Leistungsmerkmal der hier zugrunde gelegten Detektoren ist allein die Zählung von Fahrzeugen in Zeitintervallen (Verkehrsstärke).

Ein **Modell** ist die vereinfachende bildliche oder mathematische Darstellung von Strukturen, Funktionsweisen oder Verlaufsformen (Der Brockhaus, 1996). Für die vorliegende Fragestellung ist es notwendig, ein Modell des Verkehrsablaufs im Straßennetz aufzubauen.

Ein **Verfahren** ist die Abfolge von Handlungen zur Erledigung einer Aufgabe bzw. zur Lösung einer Fragestellung. Im Verkehrswesen gibt es verschiedene Verfahren, die jeweils einzelne Fragestellungen behandeln. Im Rahmen der Untersuchung werden im wesentlichen zwei Verfahren eingesetzt:

Mit einem **Routensuchverfahren** zur Ermittlung der möglichen Routen sowie einem **Umlegungsverfahren** zur Verteilung der Matrix auf den Routen wird die Anzahl der Fahrzeuge auf den gewählten Routen ermittelt.

Mit einem **Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren** wird eine als Grundlage definierte Matrix an aktuelle Detektorwerte angepasst. Statt Anpassungsverfahren wird – in Anlehnung an den allgemeinen Sprachgebrauch – hier synonym auch der Begriff Schätzverfahren verwendet. Eine Quelle-Ziel-Matrix beschreibt hier die Anzahl der Fahrten zwischen einer Quellzelle i und einer Zielzelle j . In Abgrenzung zu der Verflechtungsmatrix, wie sie aus der Nachfragemodellierung ermittelt wird, wird hier von angepassten bzw. geschätzten Quelle-Ziel-Beziehungen gesprochen.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten **Auswahlverfahren für Detektoren** bestehen aus Algorithmen, die unter Berücksichtigung von definierten Eingangsgrößen und Auswahlkriterien bestimmte Detektoren aus der Menge aller möglichen Detektorstandorte in einem festgelegten strategischen Netz als optimalen Detektorsatz auswählen.

Die im Verkehrswesen übliche Matrixschreibweise der Quelle-Ziel-Matrix wird zur besseren Verarbeitung in Algorithmen in eine Vektorform überführt, bei der die einzelnen Felder der Matrix Zeilen durchnummeriert werden (f_1, f_2, \dots, f_n).

In Anlehnung an die mathematische Schreibweise wird nach Anwendung eines Routensuch- und Umlegungsverfahrens folgender Zusammenhang hergestellt:

$$P \cdot \vec{f} = \vec{v}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1,00 & 1,00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,00 & 0,30 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,00 & 0 \\ 0 & 0 & 0,70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,30 & 0 & 0 & 1,00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,00 & 0 & 0 & 1,00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,00 & 1,00 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,66 & 1,00 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,34 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,00 & 0 & 1,00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,00 & 0 & 0 & 0,66 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,00 & 0 & 0 & 1,00 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1000 \\ 1000 \\ 500 \\ 0 \\ 200 \\ 600 \\ 600 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2000 \\ 1300 \\ 1600 \\ 700 \\ 500 \\ 1200 \\ 1200 \\ 1000 \\ 200 \\ 700 \\ 900 \\ 1100 \end{bmatrix}$$

wobei

P = Anteilsmatrix

\vec{f} = Quelle-Ziel-Matrix in Vektorform

\vec{v} = Streckenbelastungen in Vektorform

2.2 Anforderungen

An Auswahlverfahren von Detektoren wurden im Rahmen dieser Arbeit folgende Anforderungen gestellt:

- Bestimmung der Anzahl der für die jeweilige Randbedingung erforderlichen Detektoren bei geringst möglicher Abweichung (mittleres Fehlerquadrat) der mit dem Detektorsatz angepassten Quelle-Ziel-Matrix von einer Soll-Matrix,
- Einfache Ermittlung und hohe Verlässlichkeit der Eingangsdaten,
- Robustheit des ermittelten Detektorsatzes gegenüber Veränderungen der Randbedingungen.
- Einfache Integration in bestehende Verkehrsmanagement-Tools.

2.3 Untersuchungsmethode

Für die Auswahl eines optimalen Detektorsatzes sind unterschiedliche Auswahlverfahren möglich. Im Gegensatz zu einer mathematischen Herleitung eines Verfahrens aufgrund einer vorher definierten Zielfunktion (vgl. Bisherige Arbeiten in **Kapitel 3**) wurde im Rahmen dieser Arbeit ein iteratives Vorgehen gewählt, bei dem die Ergebnisse eines Untersuchungsschritts mit praktischer Erprobung zur Anpassung und Verbesserung des Verfahrens führen. Wie sich zeigen wird, bestätigen die hier getroffenen Schlussfolgerungen in Teilen die Erkenntnisse aus den mathematischen Herleitungen.

In **Bild 1** sind die einzelnen Arbeitsschritte der Untersuchung in einem Ablaufdiagramm dargestellt.

Zunächst wurde ein Modell des ausgewählten Testgebiets aufgebaut. Da im weiteren Verlauf der Bearbeitung Routensuch- und Umlegungsverfahren sowie Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren zum Einsatz kommen, wird das strategische Straßennetz in einem makroskopischen Nachfrage-Modell abgebildet (VISUM bzw. VISUMonline³, PTV AG), das beiden Verfahren integriert.

³ VISUM und VISUMonline verfügen über die gleichen Grundfunktionalitäten bei der Umlegung. In VISUM ist das Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren VstromFuzzy integriert, in VISUMonline ist es der Path Flow Estimator. Deshalb kommen hier beide Programme zum Einsatz.

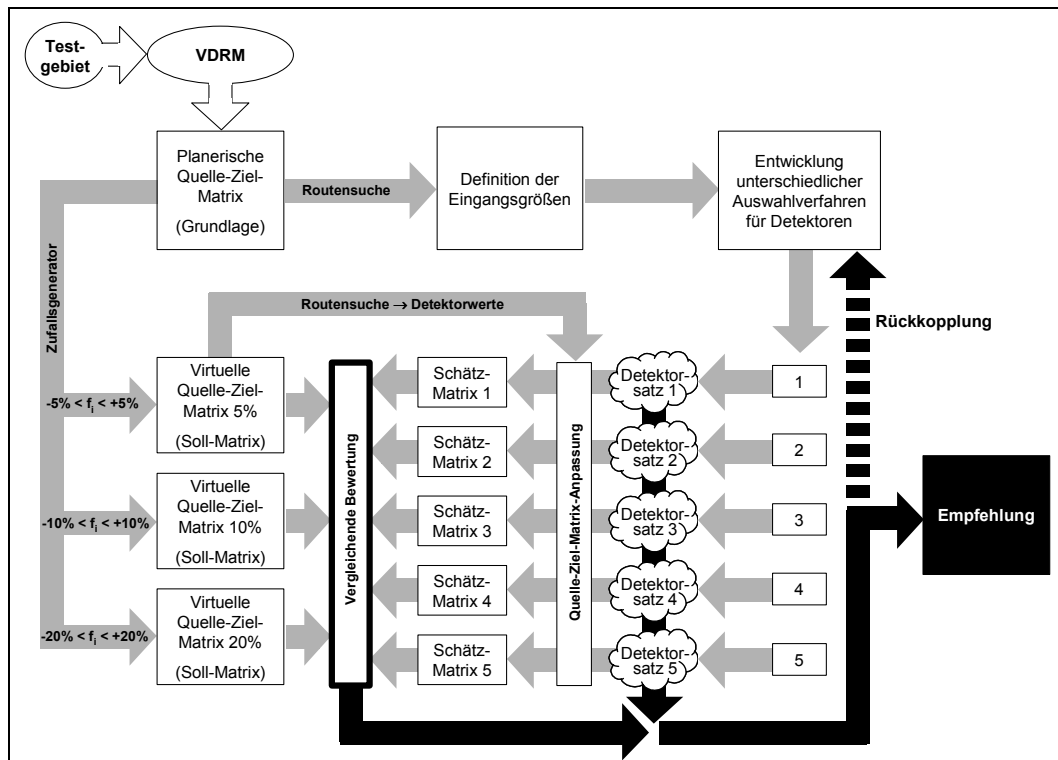


Bild 1: Untersuchungsmethode

In Ermangelung historischer Erhebungsdaten aus dem Testgebiet wurden aus der Verkehrsdatenbasis Rhein-Main (VDRM)⁴ planerische, historische Quelle-Ziel-Matrizen ermittelt. Aus dieser historischen Quelle-Ziel-Matrix (im weiteren auch Grundmatrix genannt) werden mit Hilfe eines Zufalls-generators in einem definierten Abweichungsintervall von der Grundmatrix (beispielsweise +/- 10%) verschiedene virtuelle Quelle-Ziel-Matrizen erzeugt (**Abschnitt 5.1.5**). Diese Quelle-Ziel-Matrizen (im weiteren auch Soll-Matrizen genannt) werden während der Entwicklungsphase als Ersatz für reale Verkehrsverhältnisse herangezogen. Mit ihnen wird eine synthetische Untersuchungsumgebung aufgebaut.

Die Grundmatrix dient darüber hinaus als Input für die entwickelten Auswahlverfahren. Nach ihrer Umlegung auf das strategische Netz

⁴ Die VDRM beinhaltet eine 24h-Quelle-Ziel-Matrix sowie ein kalibriertes makroskopisches Nachfrage-Modell (VISUM) für das komplette Rhein-Main-Gebiet. Aus der 24h-Quelle-Ziel-Matrix wurden in vorangegangenen Projekten Stundenmatrizen entwickelt, auf die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung aufgebaut werden konnte.

werden zunächst die Eingangsgrößen für die Detektorauswahl definiert. Anschließend werden auf der Grundlage der Eingangsgrößen unterschiedliche Auswahlverfahren für Detektoren entwickelt.

Mit jedem der Auswahlverfahren wird ein Detektorsatz bestimmt. Um die Detektorsätze (und damit die Auswahlverfahren) vergleichend bewerten zu können, werden diese zur Quelle-Ziel-Matrix-Anpassung herangezogen.

Dazu werden durch Umlegung der Soll-Matrizen, die mit einem Zufalls-generator aus der Grundmatrix erzeugt wurden, die Detektorwerte des jeweiligen Detektorsatzes bestimmt. Das Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren ermittelt dann mit den Werten des Detektorsatzes und der Grundmatrix eine neue, angepasste Quelle-Ziel-Matrix. Diese sollte mit der jeweiligen Soll-Matrix übereinstimmen. Die Abweichung zwischen geschätzter Quelle-Ziel-Matrix und Soll-Matrix wird als Maß für die Bewertung des Detektorsatzes herangezogen.

2.4 Bewertungsebenen und Bewertungskriterien

Durch die gewählte Vorgehensweise der Rückkopplung aus dem Einsatz des Verfahrens werden verschiedene Bewertungsebenen (**Bild 2**) aufgebaut und im Weiteren angewendet:

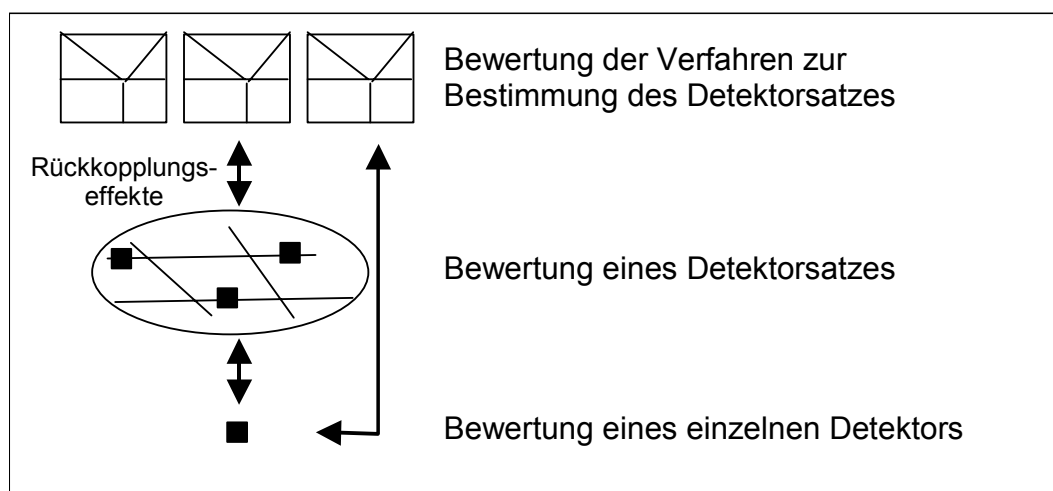


Bild 2: Bewertungsebenen

2.4.1 Vergleichende Bewertung der Verfahren

In der höchsten Bewertungsebene werden die entwickelten Auswahlverfahren für Detektoren vergleichend bewertet werden. Dazu werden mit jedem durch die einzelnen Verfahren ermittelten Detektorsätze mehrere Versuche durchgeführt.

Die Bewertung erfolgt nach folgenden Kriterien:

- Anzahl der Detektoren, der mit dem jeweiligen Verfahren ermittelten Detektorsätze,
- Qualität der geschätzten Quelle-Ziel-Matrizen im Mittel über alle entsprechenden Versuche (siehe **Abschnitt 2.4.2**),

sowie zusätzlich

- Robustheit des Verfahren im Einsatz unter verschiedenen Randbedingungen anhand der Kriterien Einfluss der eingesetzten Verfahren und Einfluss unterschiedlicher Quelle-Ziel-Matrizen (siehe **Abschnitt 2.4.2**),
- Aufwand der Ermittlung der erforderlichen Eingangsdaten.

2.4.2 Bewertung eines Detektorsatzes

Mit einem einzelnen ermittelten Detektorsatz können für unterschiedliche Randbedingungen Quelle-Ziel-Matrizen geschätzt werden.

Hierzu werden aus den vorher definierten virtuellen Soll-Matrizen durch Umlegung Detektorwerte für jeden Detektorsatz erzeugt. Diese fließen mit der Grundmatrix in ein Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren, so dass jeder dieser Detektorsätze eine Schätzmatrix erzeugt. Bei optimaler Funktionsfähigkeit der eingesetzten Verfahren sollte die Schätz-Matrix der zugehörigen Soll-Matrix, mit der die „neuen“ Zählwerte erzeugt wurden, entsprechen. Die Abweichung der Schätzmatrix von der Soll-Matrix ist also ein Maß für die Qualität des Detektorsatzes und somit auch für die Funktionsfähigkeit des verwendeten Auswahlverfahrens (**Bild 3**).

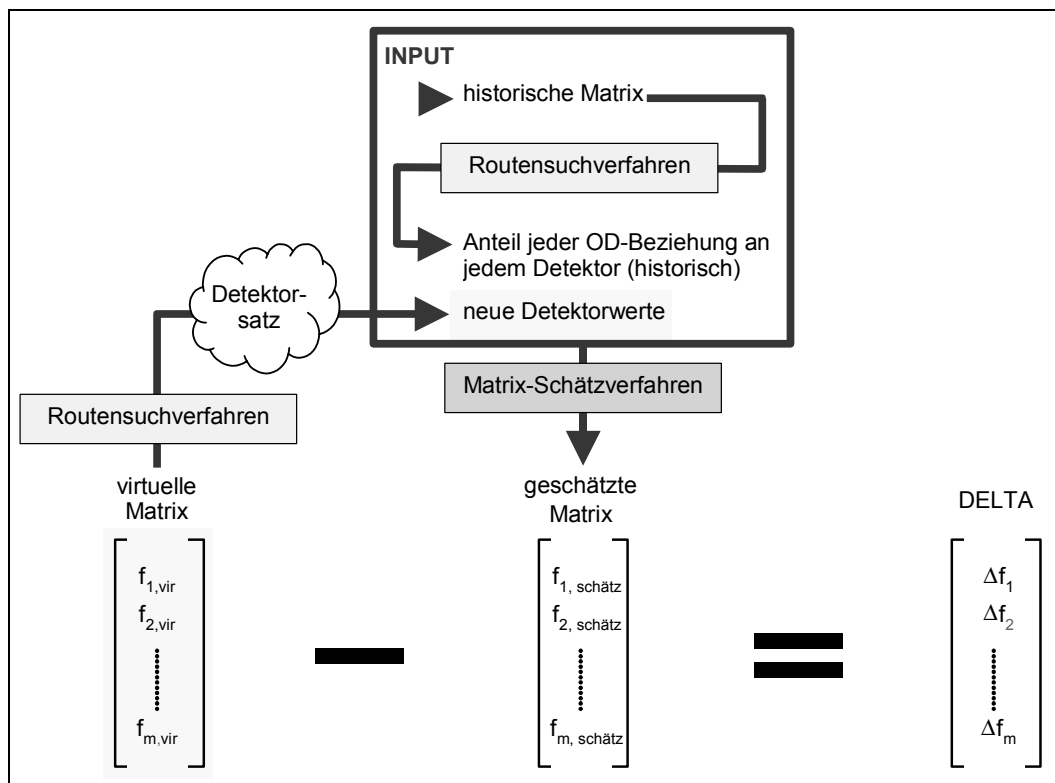


Bild 3: Bewertung eines Detektorsatzes

Die Qualität einer geschätzten Quelle-Ziel-Matrix wird durch einen **Abweichungsparameter** bewertet, der die Differenz der geschätzten Matrix zu einer definierten Soll-Matrix beschreibt. Der Abweichungsparameter berechnet sich als Funktion der Abweichungen der einzelnen Quelle-Ziel-Beziehungen (Vektor DELTA in **Bild 3**). In **Anlage 1** werden unterschiedliche Abweichungsparameter diskutiert. In der vorliegenden Arbeit wird im wesentlichen das mittlere absolute Fehlerquadrat eingesetzt.

$$A1 = \overline{\Delta f_{\text{abs}}^2} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (f_{i,\text{soll}} - f_{i,\text{geschätzt}})^2$$

Bei diesem Vorgehen besteht eine große Abhängigkeit von den eingesetzten existierenden Verfahren, Routensuch- und Umlegungsverfahren sowie Matrix-Schätzverfahren. Die Ursache für eine hohe Differenz zwischen geschätzter Matrix und virtueller Matrix kann – neben einer schlechten Kombination von Detektoren im Detektorsatz - auch auf

Ungenauigkeiten im Einsatz dieser Verfahren zurückzuführen sein. Deshalb wurden jeweils zwei existierende Verfahren im Rahmen der Untersuchung verwendet (siehe **Abschnitt 2.5**) und bewertet. Trotzdem sind die Ergebnisse unter diesem Gesichtspunkt kritisch zu betrachten.

Durch die Analyse der Abweichungen der Soll-Matrizen von den Schätzmatrizen der unterschiedlichen Detektorsätze eines Verfahrens kann abschließend auch eine Aussage über die Robustheit des Verfahrens getroffen werden.

2.4.3 Bewertung eines einzelnen Detektors

Für einzelne Detektoren können Indikatoren ermittelt werden, die indirekt Aussagen über dessen Beitrag zur Quelle-Ziel-Matrix-Anpassung liefern.

Die Indikatoren lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

- **absolute Indikatoren**, welche die absolute Größe der Belastung zur Bewertung heranziehen,
- **relative Indikatoren**, welche die relativen Verhältnisse der Belastungen untereinander zur Bewertung heranziehen, und
- **Gewichtungsparemeter**, die im praktischen Einsatz expertenbasiert festgelegt werden können.

In **Abschnitt 4.3** werden die **Indikatoren** näher erläutert.

2.5 Integration existierender Verfahren

2.5.1 Anforderungen

Die geplante Vorgehensweise erfordert im Wesentlichen den Einsatz zweier Typen von existierenden Verfahren. Zur Bestimmung der erforderlichen Datenbasis für die Quelle-Ziel-Matrix-Anpassung sowie für die Definition von Parametern für die vergleichende Bewertung muss ein **Routensuch- und Umlegungsverfahren** eingesetzt werden, mit dem die Anteile der Quelle-Ziel-Beziehungen an jedem Detektor ermittelt werden.

Weiterhin ist im Rahmen der Bewertung eines Detektorsatzes ein **Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren** einzusetzen.

Die Abhängigkeit der Ergebnisse der vergleichenden Bewertung von den eingesetzten Routensuch- und Umlegungsverfahren sowie Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren ist erheblich. Deshalb wurden jeweils zwei Verfahren zum Einsatz ausgewählt und deren Einfluss bewertet. Bei der Auswahl der Verfahren spielte neben der Tauglichkeit für das vorliegende Problem auch die Verfügbarkeit einer am Markt verfügbaren Version und die Möglichkeit der Einbindung in das im Rahmen dieser Untersuchung entwickelte Programm eine Rolle.

Im Folgenden werden die eingesetzten Verfahren nur im Überblick erläutert. Sie werden nur für die hier relevante Fragestellung ausführlicher in einem Beispiel (**Abschnitt 2.5.4**) getestet. Weitere Details zur theoretischen Funktionsweise finden sich in der einschlägigen Literatur zum Thema.

2.5.2 Routensuch- und Umlegungsverfahren

Allgemeines

Routensuch- und Umlegungsverfahren haben die Aufgabe, die Verkehrsnachfrage, die in Form einer Quelle-Ziel-Matrix vorliegt, auf ein definiertes Straßennetz zu verteilen. Dabei werden die besten Wege zwischen zwei Zellen aufgrund der Widerstände ihrer Streckenabschnitte bewertet und gewählt.

Es stehen viele Routensuch- und Umlegungsverfahren in der Praxis zur Verfügung. Die im folgenden erläuterten beiden Verfahren, die im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kommen, wurden ausgewählt, da sie durch ihre Umsetzung im Programm VISUM vielfach praktisch erprobt wurden und zusätzlich für das untersuchte, in Visum kodierte und geeichte Netz zur Verfügung standen.

Der Einsatz anderer Routensuch- und Umlegungsverfahren ist jederzeit möglich, wenn das Netzmodell für diese Verfahren kodiert und geeicht wird.

Gleichgewichtsverfahren nach dem 1. Wardrop'schen Prinzip⁵

Beim Gleichgewichtsverfahren wird in der ersten Phase die Quelle-Ziel-Matrix sukzessiv umgelegt. Dazu wird die Quelle-Ziel-Matrix nach einem definierten Prozentsatz in Scheiben geteilt (bspw. 30%-30%-20%-10%-10%). Im ersten Schritt wird die erste Scheibe der Matrix nach Bewertung der Widerstände im unbelasteten Netz (Streckenlänge, zul. Geschwindigkeit) auf die Verkehrswege verteilt. Im nächsten Schritt werden die Widerstände nach der ersten Umlegung belastungsabhängig neu berechnet, und anschließend wird die nächste Scheibe der Matrix umgelegt. Auf diese Weise wird die gesamte Matrix umgelegt.

In der zweiten Phase werden die gewählten Routen zwischen zwei Zellen paarweise verglichen, und die Routenbelastung wird solange verändert, bis die Widerstände auf beiden Routen gleich sind.

Dadurch stellt sich ein Nutzeroptimum ein, bei dem ein Verkehrsteilnehmer beim Wechsel auf eine alternative Route keinen Vorteil erreichen würde.

Lernverfahren nach Lohse⁶

Beim Lernverfahren nach Lohse wird die Matrix in einer ausreichenden Anzahl von Iterationen immer zu 100% umgelegt. Dabei werden die Widerstände der jeweils folgenden Iteration aus der aktuellen Belastung und den Widerständen der letzten Schätzung abgeleitet.

Es wird so die Lernfähigkeit der Verkehrsteilnehmer abgebildet, die ihre Routen entsprechend den Erfahrungen der letzten Fahrten im gleichen Netz wählen.

⁵ PTV-Handbuch VISUM (1998) und Schnabel/Lohse (1997)

⁶ PTV-Handbuch VISUM (1998) und Schnabel/Lohse (1997)

2.5.3 Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren

Allgemeines

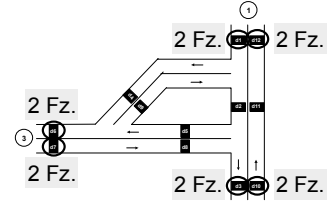
Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren haben die Aufgabe, aus Querschnittsmessungen (Detektorwerten) die zugehörige Quelle-Ziel-Matrix zu schätzen.

Selbst die vollständige Erfassung aller Strecken reicht zur eindeutigen Bestimmung der Matrix als Bedingung nicht aus. Es sind in der Regel immer mehrere Quelle-Ziel-Matrizen, welche die Detektorwerte erfüllen können. Die Verfahren verwenden also Zusatzbedingungen, mit denen aus der Menge der passenden Quelle-Ziel-Matrizen diejenige ausgewählt wird, die entsprechend der Zusatzbedingung am wahrscheinlichsten ist. Dabei fließt in der Regel eine bekannte historische oder planerische Quelle-Ziel-Matrix als wichtige Nebenbedingung ein. Sie wird dann an die neuen Detektorwerte angepasst.

VStromFuzzy nach der Minimierung des Informationsgewinns (VanZuylen)

Bei der Minimierung des Informationsgewinns wird diejenige Quelle-Ziel-Matrix aus der Menge der möglichen Quelle-Ziel-Matrizen für die gegebenen Detektorwerte ausgewählt, die den Messwerten ein Minimum an Information hinzufügt. Der Informationsgewinn einer Matrix sind also die der Verkehrszählung hinzugefügten Informationen. Er ist durch den negativen natürlichen Logarithmus der Entropie $\mathfrak{I} = -\ln(E)$ definiert. (**nach Bosserhoff, D. (1985)**).

An dem stark vereinfachten Beispiel in **Bild 4** soll das Prinzip des minimalen Informationsgewinns erläutert werden. Für das 3-zellige Beispielnetz wurden jeweils an den Ein- und Ausfahrten je 2 Fahrzeuge im Zeitintervall gemessen.



$$\text{Entropie} = E = \frac{F_s! \cdot \prod_{a=1}^n v_a}{\prod_{j=1}^m (f_j!)}$$

F_s = Summe aller Fahrzeuge im Netz
 v_a = Meßwerte der Detektoren
 f_j = Stärke der Verkehrsbeziehung

$$\text{Informationsgewinn} = I = -\ln \left(F_s! \cdot \prod_{a=1}^n (v_a!) \cdot \prod_{j=1}^m \left(\frac{1}{f_j!} \right) \right)$$

	1	2	3	Σ
1	-	0	2	2
2	2	-	0	2
3	0	2	-	2
Σ	2	2	2	6

$$I_1 = -\ln \left[6! \cdot (2! \cdot 2! \cdot 2! \cdot 2! \cdot 2! \cdot 2!) \cdot \left(\frac{1}{0!} \cdot \frac{1}{2!} \cdot \frac{1}{2!} \cdot \frac{1}{0!} \cdot \frac{1}{0!} \cdot \frac{1}{2!} \right) \right] = -8,66$$

	1	2	3	Σ
1	-	1	1	2
2	1	-	1	2
3	1	1	-	2
Σ	2	2	2	6

$$I_2 = -\ln \left[6! \cdot (2! \cdot 2! \cdot 2! \cdot 2! \cdot 2! \cdot 2!) \cdot \left(\frac{1}{1!} \cdot \frac{1}{1!} \cdot \frac{1}{1!} \cdot \frac{1}{1!} \cdot \frac{1}{1!} \cdot \frac{1}{1!} \right) \right] = -10,74$$

	1	2	3	Σ
1	-	2	0	2
2	0	-	2	2
3	2	0	-	2
Σ	2	2	2	6

$$I_3 = -\ln \left[6! \cdot (2! \cdot 2! \cdot 2! \cdot 2! \cdot 2! \cdot 2!) \cdot \left(\frac{1}{2!} \cdot \frac{1}{0!} \cdot \frac{1}{0!} \cdot \frac{1}{2!} \cdot \frac{1}{2!} \cdot \frac{1}{0!} \right) \right] = -8,66$$

Bild 4: Beispiel zur Erläuterung des Prinzips des minimalen Informationsgewinns

Das Verfahren wählt nun (im ungewichteten Fall, d.h. ohne Grundmatrix) diejenige Quelle-Ziel-Matrix aus den drei möglichen aus, bei welcher der Informationsgewinn minimal wird. Zur Ermittlung der Matrix wird im Einsatz des Verfahrens also die erste Ableitung der Formel des Informationsgewinns gleich Null gesetzt und so das Minimum bestimmt. Auf die Lösung dieses Optimierungsproblems soll hier im Detail nicht weiter eingegangen werden (siehe **Van Zuylen, H. (1979)**).

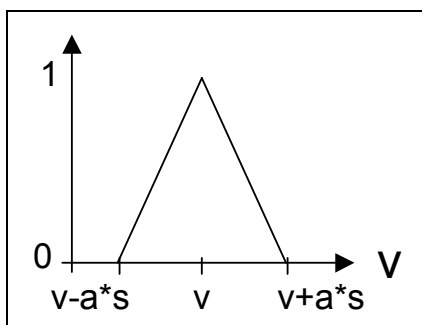


Bild 5: Fuzzy sets in VStromFuzzy

Das hier verwendete Programm VStromFuzzy in VISUM basiert auf dem gleichen Prinzip. Jedoch werden die Zählwerte nicht als scharfe Werte gesehen, sondern wie in **Bild 5** dargestellt im Intervall $v \pm \alpha \cdot s$ „fuzzifiziert“ (nach **PTV – Handbuch VISUM (1998)**).

Path Flow Estimator (PFE)

Am Netzbeispiel in **Bild 6** wird das Prinzip des PFE erläutert.

Anhand eines Detektorwerts sollen die Belastungen der beiden Routen (Path1 und Path2) abgeschätzt werden.

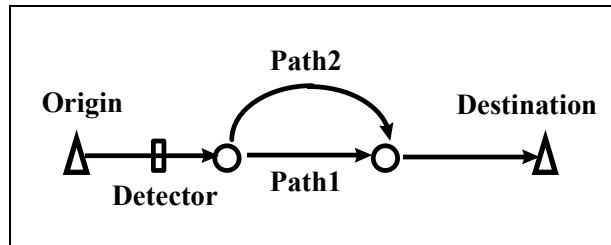


Bild 6: Netzbeispiel PFE⁷

Das Verhältnis zwischen den Kosten der beiden Routen und der Wahrscheinlichkeit der Wahl einer bestimmten Route ist durch das Logit Modell bestimmt (**Bild 7**). Es wird angenommen, dass der Pfad mit den geringeren Kosten von einer Mehrzahl der Verkehrsteilnehmer gewählt wird.

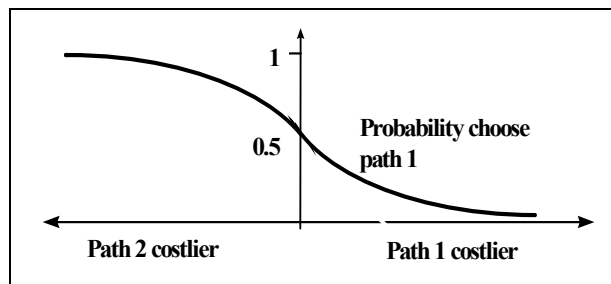


Bild 7: Logit Modell PFE⁷

Die Kosten einer Route setzen sich aus einem fixen Anteil (unbelastetes Netz) und einem belastungsabhängigen Anteil zusammen.

Bild 8 zeigt die beiden Kostenfunktionen bei zunehmendem Verkehr. Rechts des Schnittpunktes hat Path1 die höheren Kosten, links ist es Path2.

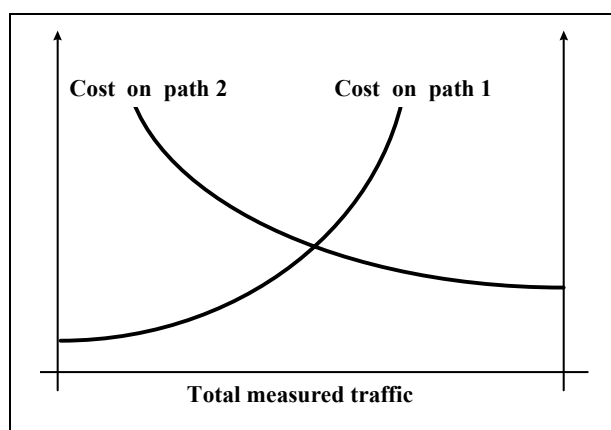


Bild 8: Kostenfunktionen PFE⁷

⁷ Grosso/Bell et al. (1998)

In Bild 9 ist der Unterschied der Kosten der beiden Routen über dem Anteil des Verkehrs auf Path1 aufgetragen.

Die Kurve S-S stellt das Verhältnis zwischen den Anteilen des Verkehrs auf beiden Routen und dem daraus resultierenden Unterschied der Kosten auf der Angebotsseite (Supply) dar. Die Kurve D-D stelle das nachfrageseitigen Verhältnis (Demand) zwischen dem Unterschied der Kosten und den Anteil der Routenwahl dar.

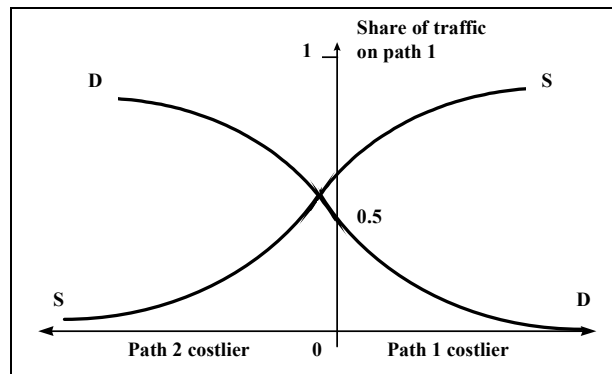


Bild 9: Gleichgewichtszustand PFE⁸

Der Detektorwert wird auch hier als „weiche“ Größe innerhalb eines Konfidenz-Intervalls angenommen. Die Quelle-Ziel-Beziehungen können aus den so ermittelten Routenbelastungen abgeleitet werden. In **Bell/Shield (1994)** und **Grosso/Bell et al. (1998)** ist das Verfahren im Detail erläutert.

Wichtig für die vorliegende Aufgabe ist die Möglichkeit, die Grundmatrix – über die Bestimmung der Routen-Streckenabschnittsmatrix hinaus – auch noch als Gewichtung für die Schätzung der neuen Routenbelastungen heranzuziehen. Dabei besteht die Möglichkeit die alte Matrix als Startwert oder als Bedingung zu definieren. Gerade bei minimaler Anzahl an Detektoren wird sich zeigen, dass nicht erhobene Streckenabschnitte und die davon betroffenen Quelle-Ziel-Beziehungen nur in unzureichender Qualität geschätzt werden können.

⁸ Grosso/Bell et al. (1998)

2.5.4 Analyse der Funktionsweise und Funktionsfähigkeit

Anhand eines Beispiels soll die Funktionsweise und Funktionsfähigkeit der eingesetzten Verfahren für die vorliegende Aufgabe analysiert werden.

Das Beispielnetz besteht aus zwei Zellen (1 und 2) und vier Kanten, wobei auf zwei der Kanten, wie in **Bild 10** bzw. **Bild 13** dargestellt, Detektoren liegen (d1 und d2). In der Ausgangssituation wurde die Quelle-Ziel-Matrix 1→2 mit 1000 Fahrzeugen festgesetzt. Weiterhin werden drei unterschiedliche Soll-Matrizen (Fall A, B und C) definiert, die geschätzt werden sollen. In **Bild 10** sind die Ergebnisse aus einer Gleichgewichtsumlegung dargestellt. Die unterschiedliche Verteilung auf die Routen, die notwendig ist, um die Problematik zu zeigen, wurde dadurch erreicht, dass die Kapazität des eigentlich kürzeren Zwischenstücks (bei d1) auf 800 Fz. herabgesetzt wurde. Alle anderen Kapazitäten sind ausreichend bemessen, die zulässigen Geschwindigkeiten sind gleich.

Grundmatrix (mit Gleichgewicht)	Soll-Matrix (mit Gleichgewicht)	
<p>1→2: 1000 Fz. 340 1000 660 1000</p>	<p>Fall A 0 Fall B 578 Fall C 1541</p> <p>Fall A 1→2: 750 Fz. Fall B 1→2: 1700 Fz. Fall C 1→2: 2300 Fz.</p>	
Detektorsatz	Schätzergebnis (PFE)	Schätzergebnis (VStromFuzzy)
	<p>Fall A 0 Fall B 0 Fall C 0</p>	<p>Fall A 386 Fall B 578 Fall C 391</p>
	<p>Fall A 0 Fall B 733 Fall C 1386</p>	<p>Fall A Keine Lösung! Fall B 578 Fall C Keine Lösung!</p>

Bild 10: Analyse der Schätzverfahren bei Gleichgewichtsumlegung

Schätzung mit nur einem Detektor

Im ersten Vergleich wird nur der Detektor d1 zur Schätzung herangezogen.

Im Fall A ist der PFE in der Lage die gewünschte Verkehrssituation zu schätzen. Betrachtet man jedoch Fall B und C, wird deutlich, dass der PFE (trotz Heranziehung der Grundlagen-Umlegung als Startsituation) immer nur die Route schätzt, auf welcher der Detektor liegt. Die Route, über die keine Informationen vorliegen wird, Null gesetzt. Damit könnte der Fall A nur zufällig erfüllt worden sein.

VStromFuzzy hingegen basiert auf der prozentuale Verteilung aus der Grundlagenmatrix und schätzt die Strecken, über die keine Informationen vorliegen, im Fall A entsprechend zu hoch ein. Im Fall B ist das durch die Gleichgewichtsumlegung ermittelte Verhältnis der Routen (34%-66%) in der Grundlage und in der zu schätzenden Situation gleich. Deshalb ist VStromFuzzy mit nur einem Detektor in der Lage, die gewünschte Verkehrssituation abzubilden. Dies ist u.a. eine Erklärung dafür, dass im Testgebiet auch schon mit einer sehr geringen Anzahl von Detektoren recht gute Ergebnisse erzielt werden können. Jedoch ist dieses Ergebnis stark abhängig von der möglichst gleichbleibenden Routenverteilung und entsprechend zu beurteilen. Ändert sich dieses Verhältnis (von 34%-66% auf 67%-33%) wie in Fall C, ist VStromFuzzy nicht mehr in der Lage, das gewünschte Ergebnis zu erzielen.

Schätzung mit zwei Detektoren

Im Fall A kann der PFE die richtige Situation abbilden, wobei das bei einem Detektor angeführte Argument der Zufälligkeit nicht mehr gilt. Die Ursache für die falsche Schätzung in Fall B beim PFE ist zunächst nicht ersichtlich.

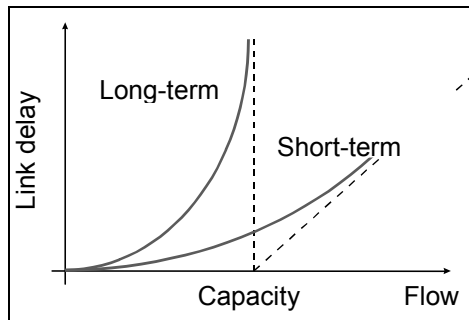


Bild 11: Einfluss der Kapazität beim PFE ⁹

Betrachtet man allerdings den Einfluss der Kapazität bei der Umlegung im PFE (**Bild 11**), wird deutlich, dass die reduzierte Kapazität auf dem kürzeren Zwischenstück nicht die Auswirkungen hat wie bei den anderen Routensuch- und Umlegungsverfahren. Die entsprechende Vorgabe im Beispiel könnte eine Ursache für die Differenz der Schätzung sein.

VStromFuzzy kann beim Einsatz zweier Detektoren keine Lösung finden, wenn die Detektoren widersprüchliche Informationen liefern. Dieses Problem tritt im Fall A und C auf. Durch Umlegung der Grundmatrix erhält VStromFuzzy die Information, dass d1 66% und d2 100% der Verkehrsbeziehung 1→2 ausmachen. Im Fall A werden durch die Detektoren d1 und d2 jeweils 750 Fahrzeuge erhoben. Für VStromFuzzy bedeutet dies:

$$1 \rightarrow 2 = 0,66 * d1 = 0,66 * 750 = \mathbf{495}$$

$$1 \rightarrow 2 = 1,00 * d2 = 1,00 * 750 = \mathbf{750} \quad \text{Widerspruch !}$$

Diesen Widerspruch kann VStromFuzzy nur bedingt durch die Einführung fuzzyfizzierter Grenzen für die Zählwertgenauigkeit lösen. Eine der wichtigen Einflussgrößen ist dabei der Abstand vom Zählwert z , bei dem die Zugehörigkeitsfunktion auf 0 abfällt: $s * \alpha$ ($0 \leq \alpha < 1$). Im **Bild 12** wird deutlich, dass im Fall genauer Zählwertgrenzen (linkes Diagramm) und im Fall geringer Schwankungsbreiten der Zählwerte (mittleres Diagramm) der Widerspruch bestehen bleibt. Nur bei ausreichender Schwankungsbreite (rechtes Diagramm) gibt es eine Schnittmenge, und es können für d1 und d2 Zählwerte angenommen werden, die den Widerspruch auflösen.

⁹ Grosso, S. / Bell, M. et al. (1998)

Jedoch sinkt bei zunehmender Schwankungsbreite die Genauigkeit des Schätzergebnisses.

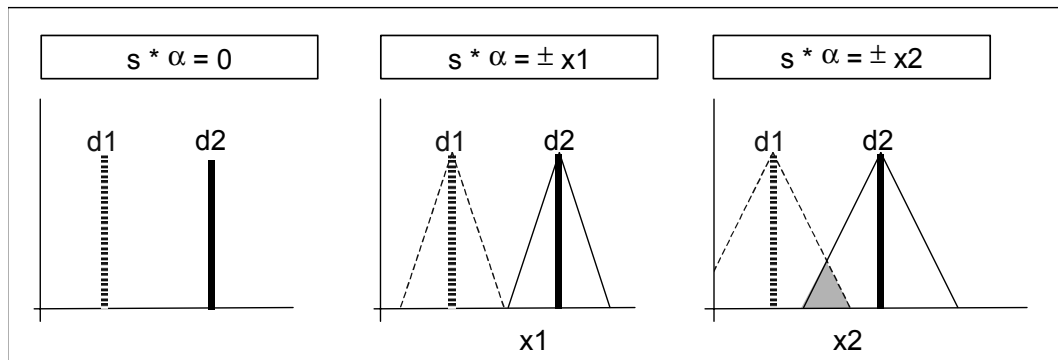


Bild 12: Funktion der fuzzyfizierten Grenzen der Zählwerte bei VStromFuzzy

Dieses Problem ist die Ursache dafür, dass VStromFuzzy beim Hinzufügen eines weiteren Detektors teilweise keine brauchbare Lösung mehr findet, obwohl vorher bereits eine geringere Abweichung der geschätzten Quelle-Ziel-Matrix erreicht wurde. Deshalb ist VStromFuzzy ein Schätzverfahren, das vor allem bei Netzen mit geringem Routensplitting zu empfehlen ist (bspw. ÖV-Netze)¹⁰.

Schätzung bei Umlegung nach Lernverfahren

Die eingesetzten Schätzverfahren wurden mit dem Beispielsnetz auch für den Fall der mit einer Umlegung nach dem Lernverfahren analysiert. Obwohl sich durch das andere Umlegungsverfahren die Routenwahl verändert darstellt, sind die bereits erläuterten Probleme auch hier zu beobachten (**Bild 13**).

¹⁰ Diverse Gespräche mit Mitarbeitern der PTV AG

Grundmatrix (mit Lernverfahren)	Soll-Matrix (mit Lernverfahren)	
<p>1→2: 1000 Fz.</p> <p>340</p>	<p>Fall A 0</p> <p>Fall B 850</p> <p>Fall C 1917</p>	<p>Fall A 1→2: 750 Fz.</p> <p>Fall B 1→2: 1700 Fz.</p> <p>Fall C 1→2: 2300 Fz.</p>
<p>Fall A 750</p> <p>Fall B 1700</p> <p>Fall C 2300</p>	<p>Fall A 750</p> <p>Fall B 850</p> <p>Fall C 383</p>	<p>Fall A 750</p> <p>Fall B 1700</p> <p>Fall C 2300</p>
Detektorsatz	Schätzergebnis (PFE)	Schätzergebnis (VStromFuzzy)
	<p>Fall A 0</p> <p>Fall B 0</p> <p>Fall C 0</p> <p>Fall A 750 750 750</p> <p>Fall B 850 850 850</p> <p>Fall C 383 383 383</p>	<p>Fall A 751</p> <p>Fall B 850</p> <p>Fall C 0</p> <p>Fall A 1502 751 1136</p> <p>Fall B 1700 850 1700</p> <p>Fall C 768 768 768</p>
	<p>Fall A 0</p> <p>Fall B 850</p> <p>Fall C 1726</p> <p>Fall A 750 750 750</p> <p>Fall B 1700 850 1700</p> <p>Fall C 2109 383 2109</p>	<p>Fall A Keine Lösung !</p> <p>Fall B 850</p> <p>Fall C Keine Lösung !</p> <p>Fall A Keine Lösung !</p> <p>Fall B 1700 850 1700</p> <p>Fall C Keine Lösung !</p>

Bild 13: Analyse der Schätzverfahren bei Umlegung nach Lernverfahren

Zusammenfassend kann vorab die grundsätzliche Einsatzfähigkeit beider Verfahren festgestellt werden. In Grenzfällen weisen beide Verfahren an unterschiedlichen Stellen Lücken auf, die jedoch im praktischen Einsatz von untergeordneter Bedeutung sind.

In **Abschnitt 6.3.2** und **Abschnitt 6.3.3** werden die Auswirkungen der erläuterten, auf der Funktionsweise der eingesetzten Verfahren beruhenden Besonderheiten auf die Untersuchungsergebnisse dargestellt.

3. Bisherige Arbeiten

Die Motivation der vorliegenden Arbeit entstand aus Forschungsaktivitäten im Bereich der Datenvervollständigung unter Einsatz von mikroskopischer Verkehrssimulation. Da sich während dieser Forschungen die Kenntnis der Quelle-Ziel-Matrix als einer der wichtigsten Grundbausteine für mikroskopische Verkehrssimulation herausstellte, trat die Frage nach den bestmöglichen Standorten für Detektoren zur Ermittlung der Quelle-Ziel-Matrix in den Vordergrund.

Arbeiten zum Thema "Optimale Detektorstandorte für mikroskopische Online-Simulationen unter Einsatz von Quelle-Ziel-Matrizen" waren zum damaligen Zeitpunkt nicht bekannt. Während der Bearbeitung stellte es sich dann als sinnvoll heraus, den Fokus auf den Einsatz von Quelle-Ziel-Matrix-Verfahren mit makroskopischen Eingangsgrößen zu setzen.

Zu diesem Thema sind im nachfolgenden die bekannt gewordenen Arbeiten diskutiert, die sich ebenfalls mit der Bestimmung von Detektorstandorten für Quelle-Ziel-Matrix-Schätzungen beschäftigen. Sie wurden teilweise parallel zu den eigenen Entwicklungen veröffentlicht. Sie werden hier besonders dargestellt, da sie die neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet der Bestimmung von Detektorstandorten darstellen und teilweise auf früheren Überlegungen aufbauen.

Location Rules (Yang / Zhou, 1998)

Ziel der von **Yang / Zhou (1998)** durchgeführten Untersuchung ist es, optimale Erfassungsstandorte für die Schätzung einer Quelle-Ziel-Matrix zu finden. Es werden folgende Bedingungen vorausgesetzt:

- Das Netz wird durch einen Graphen mit N Knoten und A Kanten $G(N,A)$ beschrieben. Dabei werden die Verkehrszellen direkt im Knoten angebunden, was zur Folge hat, dass Fahrzeuge im Knoten verschwinden bzw. auftauchen können. An diesen Knoten gilt die Regel "einfließende Ströme = ausfließende Ströme" nicht mehr.
- Der Anteil p_{aw} einer Quelle-Ziel-Beziehung w an einer Kante a ist bekannt (Anteilsmatrix P , vgl. Seite 11)

In zwei unterschiedlichen Ansätzen wird die Erfassung auf Kanten mit Kenntnis der Routenwahl als auch die Erfassung gesamter Knoten ohne Kenntnis der Routenwahl untersucht.

Basis der von **Yang / Zhou (1998)** entwickelten Regeln ist der Maximum Possible Relative Error (MPRE).

$$\text{MPRE}(\lambda) = \max G(\lambda) \quad \text{mit} \quad \sum_{w \in W} p_{aw} \cdot t_w \cdot \lambda_w = 0, \quad a \in \hat{A}$$

Der MPRE lässt sich wie folgt herleiten:

Im gegebenen Netzgraphen $G(N,A)$ gibt es eine Teilmenge der Kanten $\hat{A} (\hat{A} \subset A)$, deren Verkehrsstärke v_a erfasst wird. Die tatsächlichen Verkehrsströme zwischen einer Quelle-Ziel-Beziehung w der Menge der Quelle-Ziel-Beziehungen W werden mit t_w bezeichnet, die geschätzten Verkehrsströme mit t_w^* . Bei gegebener Anteilsmatrix können folgende Beziehungen aufgestellt werden:

$$\sum p_{aw} \cdot t_w = v_a, \quad a \in \hat{A} \quad \text{bzw.} \quad \sum p_{aw} \cdot t_w^* = v_a, \quad a \in \hat{A}$$

Dies bedeutet, dass die Verkehrsstärke auf einer Kante durch die Summe aller Quelle-Ziel-Ströme entsprechend ihres jeweiligen Anteils bestimmt wird. Die Kantenbelastungen können einmal durch die wahren (jedoch unbekannt) Quelle-Ziel-Ströme und durch die geschätzten Quelle-Ziel-Ströme bestimmt werden.

Aus der Differenz der beiden Formeln, sprich aus der Differenz der durch die wahren und die geschätzten Quelle-Ziel-Ströme berechneten Kantenbelastungen, ergibt sich:

$$\sum_{w \in W} p_{aw} \cdot (t_w^* - t_w) = 0, \quad a \in \hat{A}$$

Die relative Abweichung der geschätzten Matrix von der wahren Matrix wird durch $\lambda_w = \frac{t_w^* - t_w}{t_w}$ bestimmt¹¹. Durch Einsetzen ergibt sich

$$\sum_{w \in W} p_{aw} \cdot t_w \cdot \lambda_w = 0, \quad a \in \hat{A}$$

Wird nun die mittlere relative Abweichung mit $G(\lambda) = \sqrt{\sum_{w \in W} \frac{\lambda_w^2}{m}}$ bei m Quelle-Ziel-Beziehungen bestimmt, kann der maximal mögliche Fehler wie oben beschrieben als

$$\text{MPRE}(\lambda) = \max G(\lambda) \quad \text{mit} \quad \sum_{w \in W} p_{aw} \cdot t_w \cdot \lambda_w = 0, \quad a \in \hat{A}$$

hergeleitet werden.

Das zu lösende Optimierungsproblem ist nun **MIN MPRE**.

Yang / Zhou (1998) formulieren insgesamt vier "Location Rules" auf der Grundlage des MPRE.

Die "O-D covering Rule", die besagt, dass ein Anteil jeder Quelle-Ziel-Beziehung mindestens durch einen Detektor erfasst werden muss, wird durch Umformung von $\sum_{w \in W} p_{aw} \cdot t_w \cdot \lambda_w = 0$ hergeleitet. Mit Hilfe des Zwischenschritts $p_{aw} \cdot t_w \cdot \lambda_w + \sum_{k \neq w} p_{ak} \cdot t_k \cdot \lambda_k = 0$ lässt sich die relative Abweichung neu formulieren:

$$\lambda_w = - \frac{\sum_{k \neq w} p_{ak} \cdot t_k \cdot \lambda_k}{p_{aw} \cdot t_w}$$

Wird das Grenzwertverhalten der relativen Abweichung für den Fall $t_w^* = 0$ und $t_w > 0$ untersucht, ergibt sich $\lambda_w = \frac{0 - t_w}{t_w} = -1$. Daraus folgt λ_w

¹¹ Wenn der wahre Quelle-Ziel-Strom Null ist $t_w=0$, jedoch dort trotzdem ein Strom geschätzt wird $t_w^* \neq 0$, dann ist λ_w nicht bestimmbar (Division durch Null).

ist immer größer -1 . Aufgrund dieser Erkenntnis erfolgt eine erneute Umformung von λ_w :

$$\lambda_w \leq \frac{\sum_{k \neq w} p_{ak} \cdot t_k}{p_{aw} \cdot t_w} = \frac{v_a - p_{aw} \cdot t_w}{p_{aw} \cdot t_w} = \frac{v_a}{p_{aw} \cdot t_w} - 1$$

Wird nun der Faktor $\alpha_{aw} = \frac{p_{aw} \cdot t_w}{v_a}$ eingeführt, kann λ_w ein letztes Mal

umgeformt werden zu: $\lambda_w \leq \left(\frac{1}{\alpha_{aw}} - 1 \right)$. Da $\alpha_{aw} \leq 1$ gilt je größer α_{aw} umso

kleiner λ_w .

Daraus leiten **Yang / Zhou (1998)** die "Maximal flow fraction Rule" ab, die besagt, dass die Kante mit dem höchsten Quelle-Ziel-Anteil ausgewählt werden soll.

Zusätzlich werden noch die "Maximal Flow-intercepting Rule" (Kanten mit hoher Verkehrsstärke sind zu bevorzugen) und die "Link independence Rule" (Lineare Unabhängigkeit zwischen den gewählten Standorten) formuliert.

Zur Lösung der Regeln verfolgen **Yang / Zhou (1998)** zwei Ansätze, die sich in der Verwendung der Routenwahlinformation unterscheiden.

Im ersten Ansatz mit Verwendung der Routenwahlinformation werden 2 Traffic-Counting-Location-Probleme (TCL-P) definiert:

- Minimize $Z(z) = \sum_{a \in A} z_a$, mit $z_a = (0,1)$, \rightarrow TCL-P1
das die Anzahl der Detektoren repräsentiert.
- Maximize $F(z) = \sum_{r \in R} f_r \cdot y_r$, mit $y_r = (0,1)$, \rightarrow TCL-P2
das die Summe der erfassten Verkehrsstärke repräsentiert.

Für die Lösung der beiden Optimierungsprobleme verwenden **Yang / Zhou (1998)** einen heuristischen Algorithmus, der dem Prinzip des in

dieser Arbeit hergeleiteten "Routen-Eliminations"-Verfahrens" (**Abschnitt 4.5**) entspricht.

Im zweiten Ansatz ohne Verwendung der Routeninformation steht die Betrachtung der Knoten im Vordergrund. Die Menge der Knoten wird unterteilt in Knoten mit Quellzellenanbindung (NO), Knoten mit Zielzellenanbindung (ND), Knoten (NA), die eine Kante repräsentieren, und die übrigen Knoten (NT): $N = NO \cup ND \cup NA \cup NT$ (**Bild 14**)

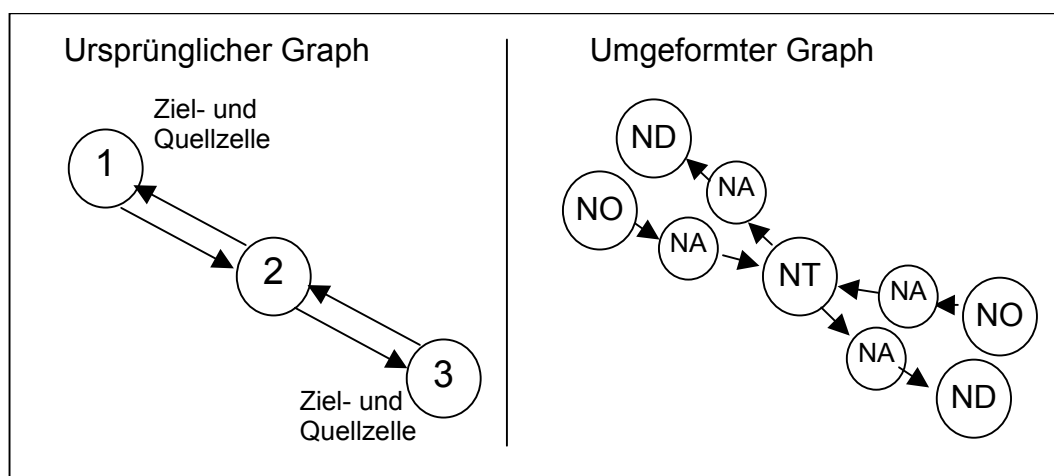


Bild 14: Umgeformtes Graphenmodell nach **Yang / Zhou (1998)**

Es wird die Verteilung der Quellbelastung auf alle anderen Zellen sowie die Abbiegeverhältnisse an allen Knoten als bekannt vorausgesetzt.

Auf der Grundlage des umgeformten Graphen wird nun ein weiteres Traffic-Countion-Location-Problem (TCL-P) definiert:

- Maximize $\varphi(z) = \sum_{j \in NA} z_j \sum_{i \in NO} \beta_i \cdot \varphi_{ij}(z)$, \rightarrow TCL-P3

Wobei Z die Menge aller Erfassungsstandorte (hier Knoten) und $z \in Z$ ist (mit $z_j = (0,1)$). Der Faktor β repräsentiert Zielverteilung ausgehend von einem Quellknoten i und der Faktor φ_{ij} steht für die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Fahrzeug, das von Zelle i startet, am erfassten Knoten j absorbiert wird.

Yang / Zhou (1998) lösen dieses Problem mit Hilfe der Markov-Entscheidungsketten, auf die hier im Detail nicht weiter eingegangen wird.

SLP - Sensor Location Problem (Bianco et al., 2001)

Ziel des von **Bianco et al. (2001)** entwickelte Verfahrens SLP (Sensor Location Problem) ist es, alle Verkehrsströme in einem Netz mit einem Minimum an Standorten zu erfassen. **Bianco et al. (2001)** gehen von folgenden Annahmen aus:

- Das Netz wird durch einen Graphen mit N Knoten und A Kanten $G(N,A)$ beschrieben. Dabei werden die Verkehrszellen direkt im Knoten angebunden, was zur Folge hat, dass Fahrzeuge im Knoten verschwinden bzw. auftauchen können.
- Ein Sensor erfasst einen kompletten Knoten mit allen ein- und ausgehenden Verkehrsströmen, (d.h. im Sinne stationärer Detektion sind hier mehrere Einzelstandorte notwendig).
- Eine historische Grundmatrix ist bekannt.
- Aus einer Umlegung der historischen Grundmatrix oder anderen Quellen sind alle Abbiegeproportionen an den Knotenpunkten bekannt.

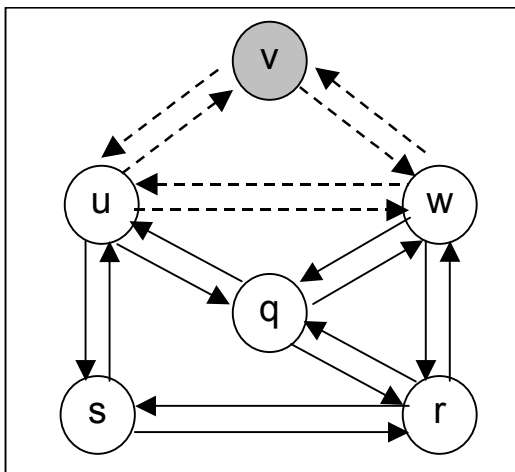


Bild 15: Einfluss den erhobenen Knotenpunktes v^{12}

Die Idee des SLP basiert auf dem Einfluss eines erhobenen Knotenpunktes auf die angrenzenden Kanten und Knotenpunkte. Wird der Knotenpunkt v erhoben, lassen sich die gestrichelt markierten Kanten mit den bekannten Abbiegeproportionen berechnen bzw. sind erhoben worden (siehe **Bild 15**). Die Menge der herleitbaren Kantenbelastungen wird mit C_M bezeichnet.

¹² aus Bianco et al. 2001

Jeder Knoten wird mit einem Gewicht versehen, das sich an der Anzahl der abgehenden Kanten festmacht. Nach dem in **Bild 15** dargestellten Prinzip kann ein lineares System (Flow Conservation Constraint System FCCS) entwickelt werden, bei dem jede Unbekannte einem einzelnen ausgehenden Strom an einem Knotenpunkt zugeordnet wird. Dieses lässt sich wie folgt darstellen:

$$B \cdot x + s = k$$

wobei

- B = Matrix der Abbiegeproportionen
(Knoten N x Kanten A , mit Graph $G = (N,A)$),
- x = unbekannter Vektor der Kantenbelastung,
- s = ausgleichender Vektor für Knoten mit Zellanbindungen, da dort die Regel "einfließende Ströme = ausfließende Ströme" nicht mehr gilt,
- k = Vektor der historischen Kantenbelastung.

Bianco et al. (2001) stellen folgende Eigenschaften des Systems fest:

- Neben den gemessenen und den beeinflussten Knoten können im System Knoten festgestellt werden, die, obwohl sie nicht im Einflussbereich eines gemessenen Knotens liegen, trotzdem herzu-leiten sind. **Bianco et al. (2001)** nennen dies den "kumulativen Effekt", der die Wirkung der Summe aller gemessenen Knoten beschreibt.
- Anhand der Menge der herzuleitenden Kanten (siehe Beispiel in **Bild 15**) kann das Netz in einen Graphen mit einer bestimmten Anzahl "q" verbundenen Komponenten umgeformt werden.
- Daraus ableitend lässt sich das System in q verschiedene Subsysteme umformen: $B^i \cdot x^i + s^i = k^i$, mit $i = 1, \dots, q$. Wobei jedes Subsystem zu einem Graphen $G^i = (N^i, A^i)$, mit $i = 1, \dots, q$ gehört, dessen Kanten im Sinne der Herleitbarkeit aus den gemessenen Knoten miteinander verbunden ist.

- Da die Matrix B eine Blockstruktur hat ($N \times A$) ist das Subsystem $B^i \cdot x^i + s^i = k^i$, mit $i=1, \dots, q$ in Bezug auf den zusammenhängenden Graphen $G^i = (N^i, A^i)$ bestimmt.

Bianco et al. (2001) unterteilen die Knoten N_i im zusammenhängenden Netzgraphen G_i (**Bild 16**).

- in Knoten, die gemessen werden M ,
- in Knoten, an denen Verkehrszellen angebunden sind S_i , und
- in Knoten, die mit gemessenen Knoten direkt verbunden sind $A_i(M)$.

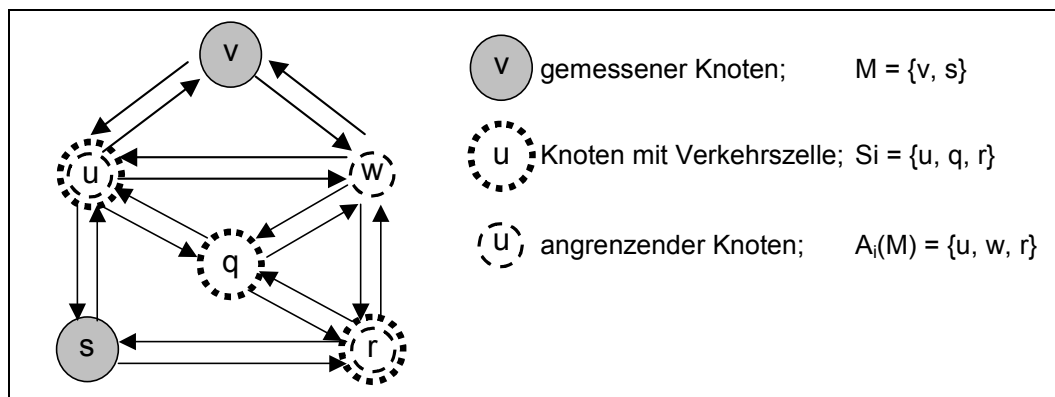


Bild 16: Differenzierung der Knoten eines Graphen

Bei einer gegebenen Menge von Kantenbelastungen, die aus gemessenen Knoten hergeleitet werden können, und einem dazugehörigen zusammenhängenden Netzgraphen, ist jeder Knoten innerhalb dieses Netzes zu bestimmen, wenn die Anzahl der Knoten mit Verkehrszellenanbindung kleiner gleich der Anzahl der an einen gemessenen Knoten angrenzenden Knoten ist, $|S_i| \leq |A_i(M)|$.

In diesem Fall ist die Anzahl der Gleichungen, die aus dem System $B^i \cdot x^i + s^i = k^i$, mit $i=1, \dots, q$ hergeleitet werden können $|N_i|$, nicht kleiner als die Anzahl der Unbekannten $|S_i| - |A_i(M)|$.

Dies bedeutet, dass die optimale Lösung des SLP nur gefunden werden kann, wenn die Bedingung $|S_i| \leq |A_i(M)|$ im zusammenhängenden Netzgraphen erfüllt ist. Diese ist jedoch abhängig von dem jeweiligen Detektorsatz.

Aufgrund dieses Zirkelbezugs verzichten **Bianco et al. (2001)** auf eine analytische Lösung des Optimierungsproblems. Stattdessen werden heuristische Lösungsansätze für das Problem untersucht.

- Lower Bound:

Für einen gegebenen Netzgraphen werden die Knoten anhand der Anzahl ihrer angrenzenden Knoten absteigend sortiert. Anschließend wird der erste Knoten dieser Liste der Menge der gemessenen Knoten hinzugefügt. Wenn nun die über alle gemessenen Knoten bestimmte Summe der um 1 erhöhten Anzahl der angrenzenden Knoten größer gleich der Anzahl der Knoten mit Verkehrszellenanbindung ist, ist der optimale Detektorsatz erreicht. Ansonsten wird der nächste Knoten der Menge der gemessenen Knoten hinzugefügt und die Abfrage wiederholt.

- Upper Bound:

Für einen gegebenen Netzgraphen wird bei Nichteinhaltung der Bedingung $|S_i| \leq |A_i(M)|$ im untergeordneten zusammenhängenden Komponenten G_i , der Knoten mit der höchsten Anzahl an Quelle-Ziel-Routen der Menge der gemessenen Knoten M hinzugefügt. Dies wird solange wiederholt bis die Bedingung $|S_i| \leq |A_i(M)|$ in allem zusammenhängenden Komponenten des Netzgraphen erfüllt ist und somit der optimale Detektorsatz erreicht ist.

Wenn Upper Bound und Lower Bound zum gleichen Ergebnis kommen, kann das Problem als eindeutig gelöst betrachtet werden.

Bianco et al. (2001) kommen zu folgenden Ergebnissen:

- Die Anzahl von optimalen erfassten Knoten entspricht etwa 1/3 der Knoten mit Verkehrszellenanbindung und etwa 3/100 der Anzahl aller möglichen Knoten.
- Bei zunehmenden Netzgrößen erscheint das Upper Bound-Verfahren als das geeignetere.
- Die Anzahl an redundanten Knoten in der Menge des ermittelten optimalen Detektorsatzes liegt bei etwa 0,1 – 0,5%.

- Bei kleinen Netzen erzielen die Heuristiken eher schlechte Ergebnisse. Die Berechnung der Qualität der geschätzten Matrix erfolgt über ein gewichtetes mittleres relatives Fehlerquadrat WMSE.

$$\text{WMSE}(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{rs} T_{rs}^* \left(\frac{T_{rs} - T_{rs}^*}{T_{rs}^*} \right)^2}{\sum_{rs} T_{rs}^*}} \cdot 100$$

wobei T_{rs} = Fahrten der Schätz-Matrix zwischen r und s

T_{rs}^* = Fahrten der Soll-Matrix zwischen r und s

Ein Vergleich dieser Arbeiten mit den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren ist in **Abschnitt 6.4** durchgeführt.

4. Entwicklung eigener Auswahlverfahren

4.1 Analyse der Permutationen und Kombinationen

Bei der Auswahl von Detektoren zur Bestimmung aktueller Quelle-Ziel-Matrizen geht es vorrangig um die vergleichende Bewertung verschiedener Detektorsätze. Es wäre theoretisch denkbar, alle möglichen Detektorkombinationen in einem Gebiet zu bewerten. In der Praxis scheitert dieses Vorgehen an der sehr großen Anzahl der Möglichkeiten.

Bei einer Vollenumeration mit n möglichen Detektorstandorten sind $n!$ Bewertungsläufe notwendig, um alle möglichen Kombinationen zu testen. Bereits bei einer Anzahl von 156 möglichen Detektorstandorten, wie im Testgebiet (**Abschnitt 5.1**), müssten $156! = 7,47 \cdot 10^{275}$ Möglichkeiten bewertet werden. Das heißt, selbst bei einem kleinen Gebiet wie dem vorliegenden, ist das Testen aller Möglichkeiten nicht realisierbar.

Das Ziel der Arbeit ist, die Anzahl der zu bewertenden Möglichkeiten einzuschränken. Dies kann zunächst auf verkehrslogischer Basis geschehen, indem auf Expertenbasis untergeordnete Streckenabschnitte ausgeschlossen werden. In der vorliegenden Untersuchung wurde dies bereits durch die Definition eines sogenannten strategischen Netzes durchgeführt, das nur die wichtigen Kanten beinhaltet. Im Testgebiet können damit immer noch 156 mögliche Detektorstandorte bestimmt werden, wenn alle Kanten zwischen zwei Knoten des strategischen Netzes als Detektorstandort definiert werden.

Weiterhin wurden die Möglichkeiten einer eingeschränkten Enumeration geprüft. Bei einer Auswahl von x Detektoren aus der Gesamtmenge von n Detektoren verbleibt die folgende Anzahl von Möglichkeiten zu bewerten:

x aus n	$\binom{n}{x} = \frac{n!}{(n-x)!x!}$
30 aus 156	$1,89 \cdot 10^{32}$ Möglichkeiten
20 aus 156	$8,39 \cdot 10^{24}$ Möglichkeiten
10 aus 156	$1,75 \cdot 10^{15}$ Möglichkeiten
5 aus 156	721.656.936 Möglichkeiten

Um nur die beste Kombination von fünf Detektoren zu ermitteln, sind also mehr als 721 Millionen Möglichkeiten zu bewerten. Die Durchführung einer solchen Bewertung wäre im praktischen Einsatz zu aufwendig.

Diese Randbedingungen hatten Einfluss bei der Entwicklung der im folgenden beschriebenen Auswahlregeln.

4.2 Einteilung der Auswahlverfahren

Die Auswahlverfahren für Detektoren zur Quelle-Ziel-Matrix-Anpassung werden hier anhand ihrer Auswahlparameter (und damit implizit anhand der Anforderungen an die Eingangsgrößen) in 2 Gruppen unterteilt:

- Verfahren, die Detektorsätze indirekt anhand von Beurteilungs-Indikatoren (ohne Einbeziehung des Schätzergebnisses) auswählen,
- Verfahren, die Detektorsätze direkt (mit Einbeziehung des Schätzergebnisses) anhand der Abweichung der daraus geschätzten Matrix von der Soll-Matrix auswählen.

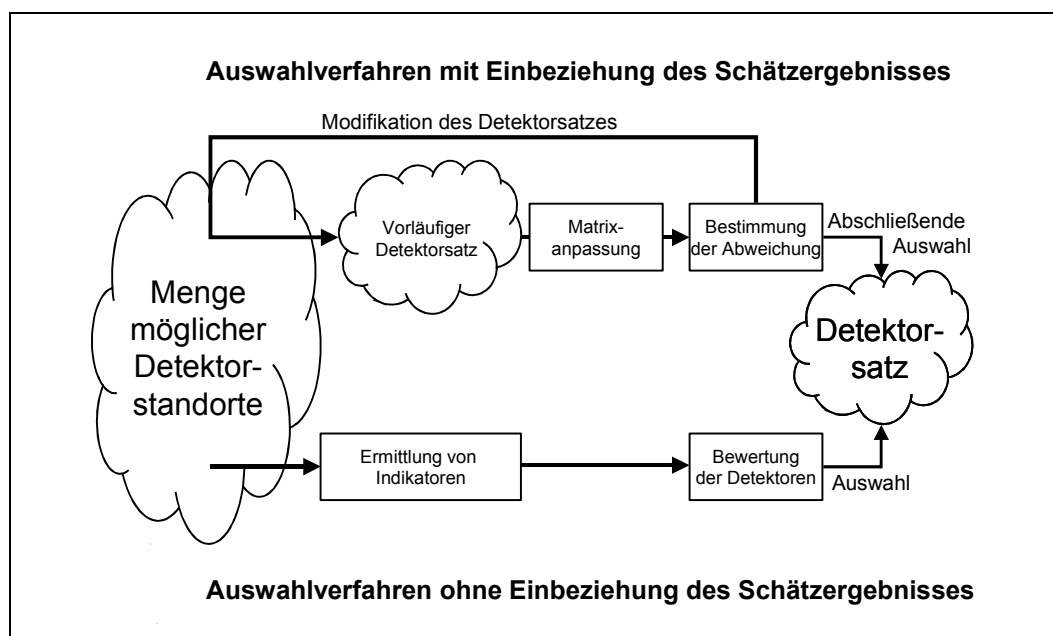


Bild 17: Prinzipielle Funktionsweise der Auswahlverfahren mit und ohne Einbeziehung der Schätzergebnisse

Bild 17 zeigt die prinzipielle Funktionsweise der Auswahlverfahren beider Gruppen.

Bei den Auswahlverfahren ohne Einbeziehung der Schätzergebnisse werden die Detektorstandorte anhand von Indikatoren bewertet, die indirekt Aufschluss über den Beitrag des Detektors zur Matrixanpassung geben. Die Matrixanpassung selbst wird nicht zur Bewertung herangezogen. Die indirekten Verfahren können unterteilt werden in Verfahren, die einen einzelnen Detektor bewerten und in Verfahren, die einen Detektorsatz bewerten (**Bild 18**).

Bei den Auswahlverfahren mit Einbeziehung der Schätzergebnisse wird zunächst ein vorläufiger Detektorsatz ausgewählt. Auf der Grundlage der Abweichung der mit dem vorläufigen Detektorsatz angepassten Quelle-Ziel-Matrix von der Soll-Matrix wird dieser anschließend so lange modifiziert, bis sich die Abweichung nicht mehr entscheidend verringert. Das Vorgehen wird in **Abschnitt 4.6** ausführlich erläutert.

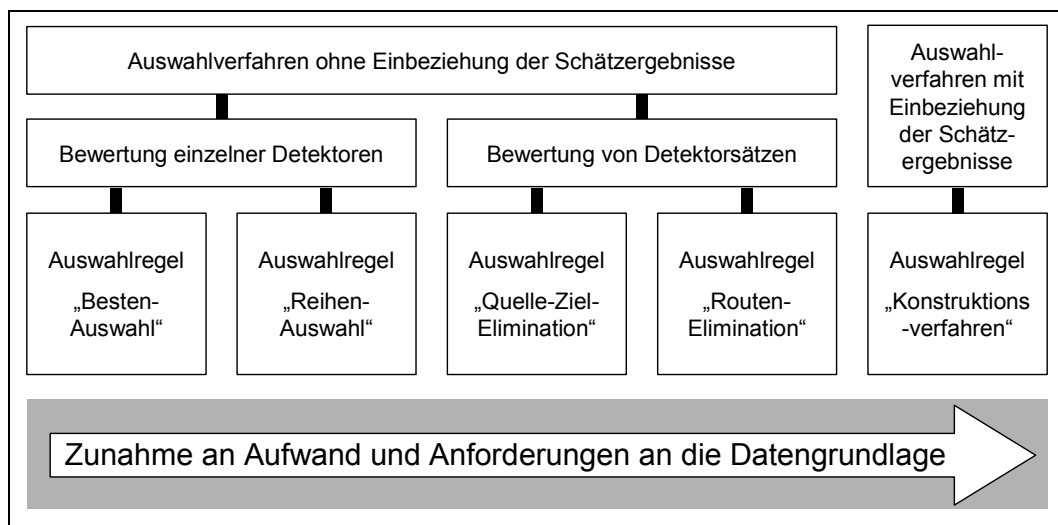


Bild 18: Einteilung der Auswahlverfahren

4.3 Definition von Indikatoren

Bei der indirekten Auswahl werden Indikatoren definiert, die Hinweise auf den Beitrag des Detektorsatzes zur Quelle-Ziel-Matrix-Anpassung liefern.

Die Indikatoren lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

- **absolute Indikatoren**, welche die absolute Größe der Belastung zur Bewertung heranziehen, und
- **relative Indikatoren**, welche die relativen Verhältnisse der Belastungen untereinander zur Bewertung heranziehen.
- Zusätzlich gibt es noch **Gewichtungsparameter**, die im praktischen Einsatz festgelegt werden können.

Am Beispiel in **Bild 19**, das die historische Quelle-Ziel-Matrix nach Anwendung eines Routensuch- und Umlegungsverfahrens symbolisiert, sollen die Indikatoren erläutert werden.

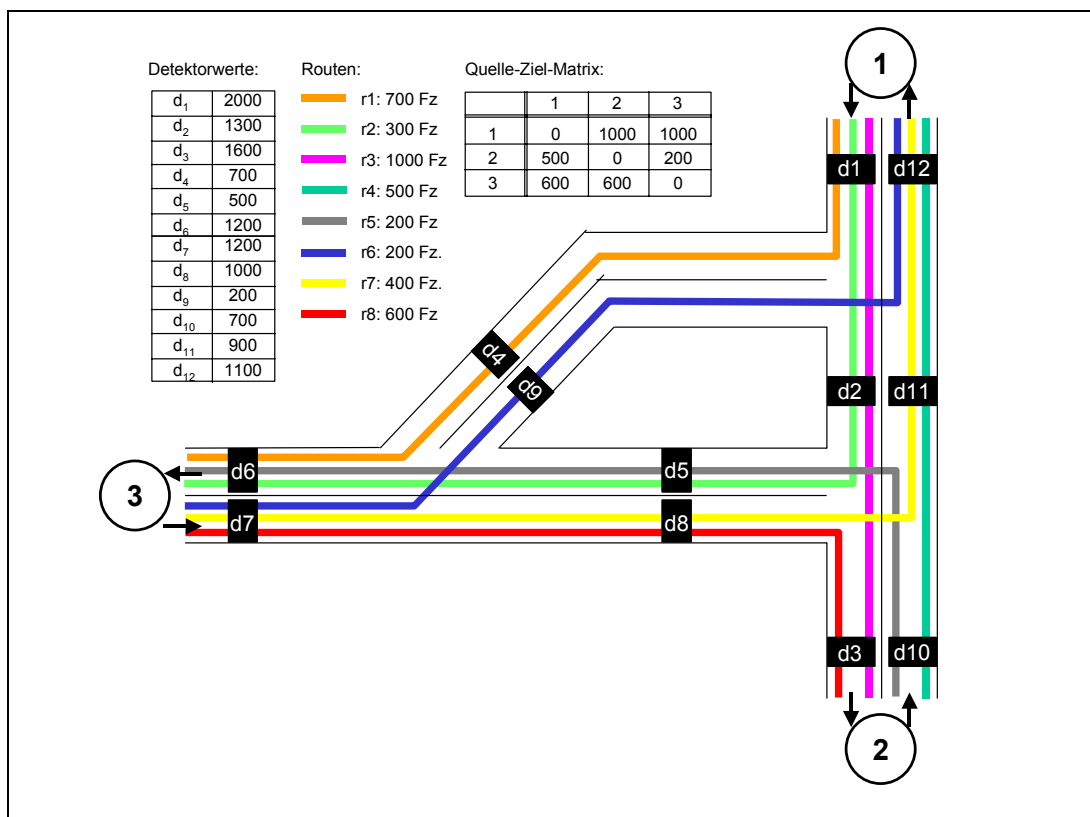


Bild 19: Beispiel zur Erläuterung der Indikatoren

Zunächst lassen sich 4 **absolute Indikatoren** definieren:

q_f = Anzahl der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Beziehung f_i im Zeitintervall

q_d = Anzahl der Fahrzeuge des Detektors d_j im Zeitintervall (Verkehrsstärke)

q_{df} = Anzahl der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Beziehung f_i , die im Zeitintervall über den Detektor d_j fahren

q_{dr} = Anzahl der Fahrzeuge der Route r_k , die im Zeitintervall über den Detektor d_j fahren

Die absoluten Indikatoren geben Aufschluss darüber, welchen absoluten Anteil ein Detektor an der Quelle-Ziel-Matrix hat.

Aus den absoluten Parametern lassen sich die beiden **relative Indikatoren** ableiten.

A_{df} = Anteil des Detektors an der Quelle-Ziel-Beziehung

A_{fd} = Anteil der Quelle-Ziel-Beziehung am Detektor

An dem Beispiel in **Bild 19** werden beide Indikatoren erläutert. Über den Detektor d_1 und d_2 fahren jeweils 100% der Quelle-Ziel-Beziehung f_2 (entspricht: Zelle 1 nach Zelle 2). Dies bedeutet einen Indikator $A_{df}(f_2, d_1) = 1,00$ und einen Indikator $A_{df}(f_2, d_2) = 1,00$. Über den Detektor d_7 fährt die Quelle-Ziel-Beziehung f_2 überhaupt nicht, deshalb beträgt der Indikator $A_{df}(f_2, d_7) = 0$. Die Quelle-Ziel-Beziehung f_3 (entspricht: Zelle 1 nach Zelle 3) fährt zu 100% über Detektor d_1 , splittet sich dann aber und fährt noch zu 70% über d_4 und zu 30% über d_2 . Dies ergibt die Indikatoren $A_{df}(f_3, d_1) = 1,00$, $A_{df}(f_3, d_2) = 0,30$ und $A_{df}(f_3, d_4) = 0,70$.

Der Indikator A_{df} ist also ein Indiz, ob und zu welchem Anteil die Quelle-Ziel-Beziehung durch den Detektor abgedeckt wird.

Über den Detektor d_6 fahren die Verkehrsbeziehungen f_3 und f_6 im Verhältnis 17% zu 83%. Dies bedeutet einen Indikator $A_{fd}(f_6, d_6) = 0,83$ und einen Indikator $A_{fd}(f_3, d_6) = 0,17$. Über Detektor d_4 fährt nur Beziehung f_3 , deshalb beträgt der Indikator $A_{fd}(f_3, d_4) = 1$.

Der Indikator A_{fd} ist also ein Indiz, welcher Anteil der Änderung eines Detektorwertes auf eine bestimmte Quelle-Ziel-Beziehung abfällt, d.h. auch, wie „rein“ die Auswirkung auf die jeweilige Quelle-Ziel-Beziehung ist.

Zusätzlich werden noch zwei weitere **Gewichtungsparameter** eingeführt. Der **Parameter $g1$** gewichtet die Quelle-Ziel-Beziehungen, denn nicht jede Quelle-Ziel-Beziehung ist gleich wichtig bei der Genauigkeit der Anpassung. In der vorliegenden Untersuchung resultiert diese Gewichtung aus der Anzahl der Fahrzeuge in einer Quelle-Ziel-Beziehung. Je größer die Anzahl der Fahrzeuge, um so wichtiger die Beziehung. In der Praxis lässt sich dieser Parameter noch entsprechend der gewünschten Informationsschwerpunkte verändern (beispielsweise hohe Gewichtung des Quellverkehrs aus bestimmten Zellen etc.).

Der zweite **Parameter $g2$** gewichtet die unterschiedlichen Detektorstandorte selbst. In der Praxis können beispielsweise dadurch Detektorstandorte aus übergeordneten Gründen (z.B. zu hoher baulicher Aufwand) abgewertet werden. In der theoretischen Untersuchungsumgebung wird dieser Parameter vernachlässigt, er ist aber für den späteren praktischen Einsatz im Verfahren vorgehalten.

Da über einen Detektor in der Regel mehrere Verkehrsbeziehungen fahren, werden mit den linken 3 Spalten der Tabelle in **Bild 20** die Bewertungsparameter anhand des Detektors d_j , der Quelle-Ziel-Beziehungen f_i und der Routen r_k , die über diesen Detektor führen, eindeutig zugeordnet und identifiziert. Beispielsweise ist in der ersten Zeile die Bewertung für Detektor d_1 durch die Route r_3 der Quelle-Ziel-Beziehung f_2 dargestellt. Der Detektor d_1 erhält noch weitere Bewertungen durch die Verkehrsbeziehung f_3 mit den Routen r_1 und r_2 . Die vergleichbare Darstellung im Testgebiet enthält je nach Routenwahl etwa 2000 bis 3000 Einzelbewertungen.

Identifizierung			Indirekte, absolute Indikator				Indir., relative Indikator		Gewichtungsparameter	
d_j	f_i	r_k	q_f	q_d	q_{df}	q_{dr}	A_{df}	A_{fd}	g_1	g_2
d1	f2	r3	1000	2000	1000	1000	1,00	0,50	1,00	1
d1	f3	r1	1000	2000	1000	700	1,00	0,50	1,00	1
d1	f3	r2	1000	2000	1000	300	1,00	0,50	1,00	1
d2	f2	r2	1000	1300	300	300	0,30	0,23	1,00	1
d2	f3	r3	1000	1300	1000	1000	1,00	0,77	1,00	1
d3	f2	r3	1000	1600	1000	1000	1,00	0,63	1,00	1
d3	f8	r8	600	1600	600	600	1,00	0,38	0,60	1
d4	f3	r1	1000	700	700	700	0,70	1,00	1,00	1
d5	f3	r2	1000	500	300	300	0,30	0,60	1,00	1
d5	f6	r5	200	500	200	200	1,00	0,40	0,20	1
d6	f3	r1	1000	1200	1000	700	1,00	0,83	1,00	1
d6	f3	r2	1000	1200	1000	300	1,00	0,83	1,00	1
d6	f6	r5	200	1200	200	200	1,00	0,17	0,20	1
d7	f7	r6	600	1200	600	200	1,00	0,50	0,60	1
d7	f7	r7	600	1200	600	400	1,00	0,50	0,60	1
d7	f8	r8	600	1200	600	600	1,00	0,50	0,60	1
d8	f7	r7	600	1000	400	400	0,67	0,40	0,60	1
d8	f8	r8	600	1000	600	600	1,00	0,60	0,60	1
d9	f7	r6	600	200	200	200	0,33	1,00	0,60	1
d10	f4	r4	500	700	500	500	1,00	0,71	0,50	1
d10	f6	r5	200	700	200	200	1,00	0,29	0,20	1
d11	f4	r4	500	900	500	500	1,00	0,56	0,50	1
d11	f7	r7	600	900	400	400	0,67	0,44	0,60	1
d12	f4	r4	500	1100	500	500	1,00	0,45	0,50	1
d12	f7	r7	600	1100	600	400	1,00	0,55	0,60	1
d12	f7	r6	600	1100	600	200	1,00	0,55	0,60	1

Bild 20: Indikatoren aus Beispiel in **Bild 19**

4.4 Verfahren basierend auf der Bewertung einzelner Detektoren ohne Einbeziehung des Schätzergebnisses

Im Nachfolgenden werden die im Rahmen der Untersuchung hergeleiteten Auswahlregeln erläutert. Die Entwicklungen werden entsprechend dem Untersuchungsablauf dargestellt, das heißt, Weiterentwicklungen einer Regel basieren zum Teil auf den – nicht immer befriedigenden –

Ergebnissen der Vorgängerregel. Es wird mit dem am wenigsten aufwendigen Verfahren begonnen.

Auswahlregel "Besten-Bewertung":

Erforderliche Eingangsparameter:

- Historische Quelle-Ziel-Matrix
- Erwartungs-Verkehrsstärke an allen möglichen Detektorstandorten (aus Umlegung historischer Matrix oder anderen Quellen)
- Anteil des Detektors an der Quelle-Ziel-Matrix (A_{df}) aus Anteilsmatrix

Der Grundgedanke der ersten Auswahlregel ist, den jeweils besten Detektor für die Schätzung jeder Quelle-Ziel-Beziehung zu identifizieren, zu bewerten und am Ende die Bewertung aller Quelle-Ziel-Beziehungen eines Detektors zu überlagern. Im Prinzip funktioniert die Auswahl nach folgendem Schema:

Fährt eine Quelle-Ziel-Beziehung über mehrere Detektoren, wird derjenige aus diesen Detektoren mit 1 bewertet, bei dem die Beziehung den größten und reinsten Anteil hat ($A_{df} * A_{fd} \rightarrow \max$). Alle anderen Detektoren werden mit Null bewertet. Ist dies für alle Quelle-Ziel-Beziehungen durchgeführt worden, werden die Bewertungen für jeden Detektor über alle Quelle-Ziel-Beziehungen summiert. Dabei kann optional die Bewertung = 1 für eine bestimmte Kombination von d_j und f_i , beim Summieren gewichtet werden. Das Ergebnis ist eine optimale Rangfolge von Detektoren, beginnend mit dem mit der höchsten Gesamtbewertung.

In **Bild 21** ist das Struktogramm dieser Auswahl dargestellt, wie es im Programm ODeFIX (**Anlage 5**) umgesetzt wurde.

Bild 20 am Beispiel aus **Bild 19** die Ergebnisse der "Besten-Bewertung". Es die Detektoren in der Reihenfolge $d_6, d_{10}, d_3, d_8, d_7, d_5$ vorgeschlagen. Bei kleinen Netzen ermittelt die "Besten-Bewertung" eine absolute Anzahl an Detektoren, da bestimmte Standorte bei keiner Quelle-Ziel-Beziehung als Beste ausgewählt werden.

Auswahlregel „Reihen-Bewertung“:

Erforderliche Eingangsparameter:

- Historische Quelle-Ziel-Matrix
- Erwartungs-Verkehrsstärke an allen möglichen Detektorstandorten (aus Umlegung historischer Matrix oder anderen Quellen)
- Anteil des Detektors an der Quelle-Ziel-Matrix (A_{df}) aus Anteilsmatrix

Grundgedanke:

Da bei der "Besten-Bewertung" der Beitrag von Detektoren vernachlässigt wird, die von keiner Quelle-Ziel-Beziehung als Beste gewählt werden, wird im Unterschied dazu bei der "Reihen-Bewertung" nicht nur der beste Detektor einer Quelle-Ziel-Beziehung bewertet.

Es werden alle Detektoren, über welche die jeweilige Quelle-Ziel-Beziehung führt, entsprechend ihrem Anteil an der Quelle-Ziel-Beziehung (A_{fd}) in die Bewertung aufgenommen. Optional können auch hier wieder weitere Gewichtungparameter einbezogen werden. Das Struktogramm dieser Auswahl ist in **Bild 23** dargestellt.

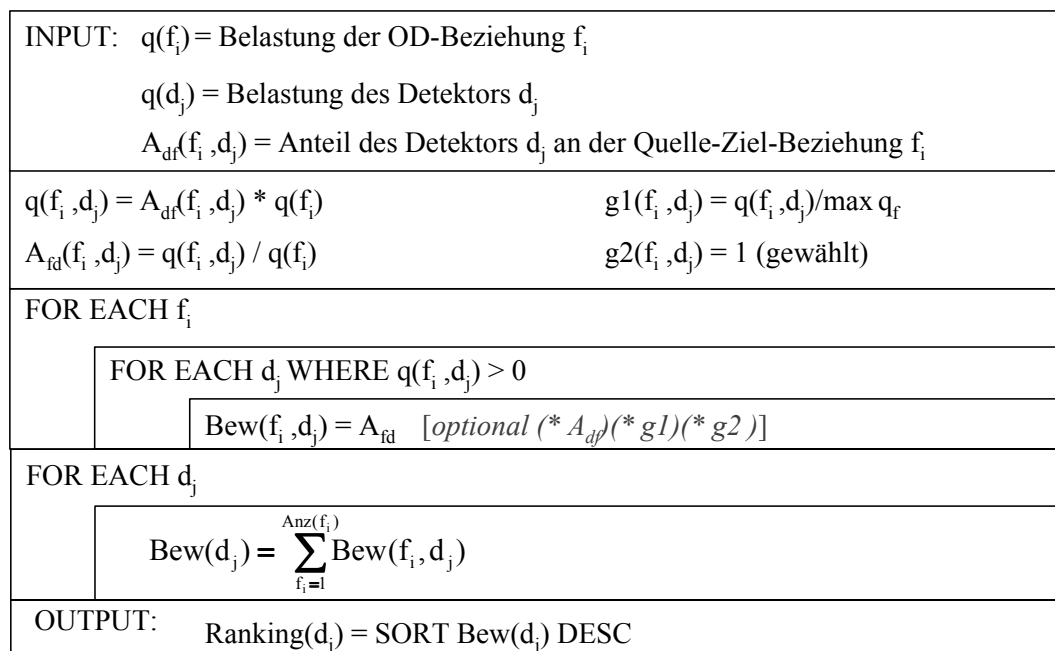


Bild 23: Auswahlregel „Reihen-Bewertung“ (Struktogramm)

dj	fi	Afd * Adf *g1	Besten- Bewertung		Summe	Reihenfolge
d1	f2	0,50	0,50	d1	1,00	1.
d2		0,07	0,07	d2	0,84	3.
d3		0,63	0,63	d3	0,86	2.
d1	f3	0,50	0,50	d4	0,70	4.
d2		0,77	0,77	d5	0,28	10.
d4		0,70	0,70	d6	0,86	2.
d5		0,18	0,18	d7	0,60	5.
d6	f4	0,83	0,83	d8	0,52	7.
d10		0,36	0,36	d9	0,20	11.
d11		0,28	0,28	d10	0,42	9.
d12	f6	0,23	0,23	d11	0,46	8.
d5		0,08	0,08	d12	0,56	6.
d6	f7	0,03	0,03			
d10		0,06	0,06			
d7		0,30	0,30			
d8		0,16	0,16			
d9		0,20	0,20			
d11		0,18	0,18			
d12	f8	0,33	0,33			
d3		0,23	0,23			
d7		0,30	0,30			
d8		0,36	0,36			

Bild 24: Auswahlregel „Reihen-Bewertung“ am Beispiel aus **Bild 19**

In **Bild 24** sind die Ergebnisse der "Reihen-Bewertung" am Beispiel aus **Bild 19** dargestellt. Es die Detektoren in der Rangfolge d1, d3, d2, d4, d7, d12, d8, d11, d10, d5 und dd9 vorgeschlagen.

Die "Reihen-Bewertung" ermittelt immer eine Rangfolge.

4.5 Verfahren basierend auf der Bewertung eines Detektorsatzes ohne Einbeziehung des Schätzergebnisses

Da die Verfahren, die auf der Bewertung eines einzelnen Detektors basieren, den Nachteil haben, dass sie die Wirkung der Kombination von Detektoren vernachlässigen, werden im Folgenden nun Ansätze untersucht, die ganze Detektorsätze bewerten. Dabei zunächst gefordert die erforderlichen Eingangsparameter nicht zu vergrößern.

Auswahlregel „OD-Elimination“:

Erforderliche Eingangsparameter:

- Historische Quelle-Ziel-Matrix
- Erwartungs-Verkehrsstärke an allen möglichen Detektorstandorten (aus Umlegung historischer Matrix oder anderen Quellen)
- Anteil des Detektors an der Quelle-Ziel-Matrix (A_{df}) aus Anteilsmatrix

INPUT: $q(f_i)$ = Belastung der OD-Beziehung f_i	
$q(d_j)$ = Belastung des Detektors d_j	
$A_{df}(f_i, d_j)$ = Anteil des Detektors d_j an der Quelle-Ziel-Beziehung f_i	
$q(f_i, d_j) = A_{df}(f_i, d_j) * q(f_i)$	$g1(f_i, d_j) = q(f_i, d_j) / \max q_f$
$A_{fd}(f_i, d_j) = q(f_i, d_j) / q(f_i)$	$g2(f_i, d_j) = 1$ (gewählt)
Mindestabdeckung = Benutzereingabe	
FOR EACH f_i	
ADD f_i to $\{f_{\text{Bewertung}}\}$	
DO UNTIL $\sum_{\{f_{\text{Bewertung}}\}} (q(f_i)) = 0$	
SELECT f_i FROM $\{f_{\text{Bewertung}}\}$ WHERE $q(f_i)$ [<i>optional (* g1)</i>] \rightarrow max	
SELECT d_j WHERE $q(f_i, d_j) > 0$ AND $q(d_j)$ [<i>optional (* g2)</i>] \rightarrow max	
ADD d_j to $\{d_{\text{Auswahl},1}, \dots\}$	
FOR EACH f_i WHERE $A_{fd}(f_i, d_{\text{Auswahl}}) >$ Mindestabdeckung	
DELETE f_i FROM $\{f_{\text{Bewertung}}\}$	
OUTPUT: Detektorsatz = $\{d_{\text{Auswahl},1}, \dots\}$	

Bild 25: Auswahlregel „OD-Elimination“ (Struktogramm)

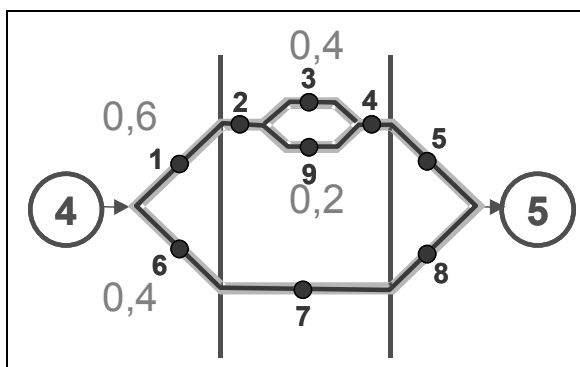
Bei der Auswahlregel „OD-Elimination“ werden zunächst alle Quelle-Ziel-Beziehungen der Menge der zu bewertenden Quelle-Ziel-Beziehungen hinzugefügt. Anschließend wird die Quelle-Ziel-Beziehung mit der höchsten Belastung ausgewählt. Dann wird aus den Detektoren, über die die ausgewählte Quelle-Ziel-Beziehung führt, derjenige mit der höchsten Belastung ausgewählt. Anschließend wird überprüft, ob der ausgewählte

Detektor noch andere Quelle-Ziel-Beziehungen abdeckt, wobei der Anteil der Quelle-Ziel-Beziehung (A_{fd}) am Detektor über einer bestimmten, vorher definierten Mindestabdeckung liegen sollte.

Sämtliche diese Bedingung erfüllende Quelle-Ziel-Beziehungen werden von der weiteren Bewertung ausgeschlossen. Die gesamte Bewertungsschleife wird solange wiederholt, bis für alle Quelle-Ziel-Beziehungen die gewünschten Mindestabdeckung erreicht wurden d.h. die Summe aller Quelle-Ziel-Belastungen in der Bewertungsmenge gleich Null ist (**Bild 25**).

In **Bild 27** sind die Ergebnisse der "OD-Elimination" am Beispiel von **Bild 19** dargestellt. Es werden die Detektoren d1, d3, d7, d12 und d8 gewählt.

Exkurs: Problematik bei fehlender Kenntnis der Routenwahl



Wie die Erfahrungen beim Einsatz des "OD-Eliminations-Verfahrens" gezeigt haben, gestaltet sich die Vermeidung der Auswahl redundanter Detektoren sehr schwierig, wenn die Routenwahl nicht bekannt ist. An **Bild 26** soll dieses Problem erläutert werden.

Bild 26: Problematik Routenwahl

Sind für jeden Detektor nur dessen Anteile an der Quelle-Ziel-Beziehung bekannt, kann nach Auswahl des Detektors 1, der 60% der Quelle-Ziel-Beziehung eliminiert, nicht eindeutig bestimmt werden, ob Detektor 3 oder Detektor 6 zusätzliche Informationen liefern. Erst durch die Kenntnis über die Routenwahl lässt sich feststellen, dass Detektor 3 redundante Informationen liefern würde. Nur einer der Detektoren 6, 7 oder 8 würde die Abdeckung erhöhen. Daraus folgt die Herleitung des Verfahrens der "Routen-Elimination" (**Seite 53**).

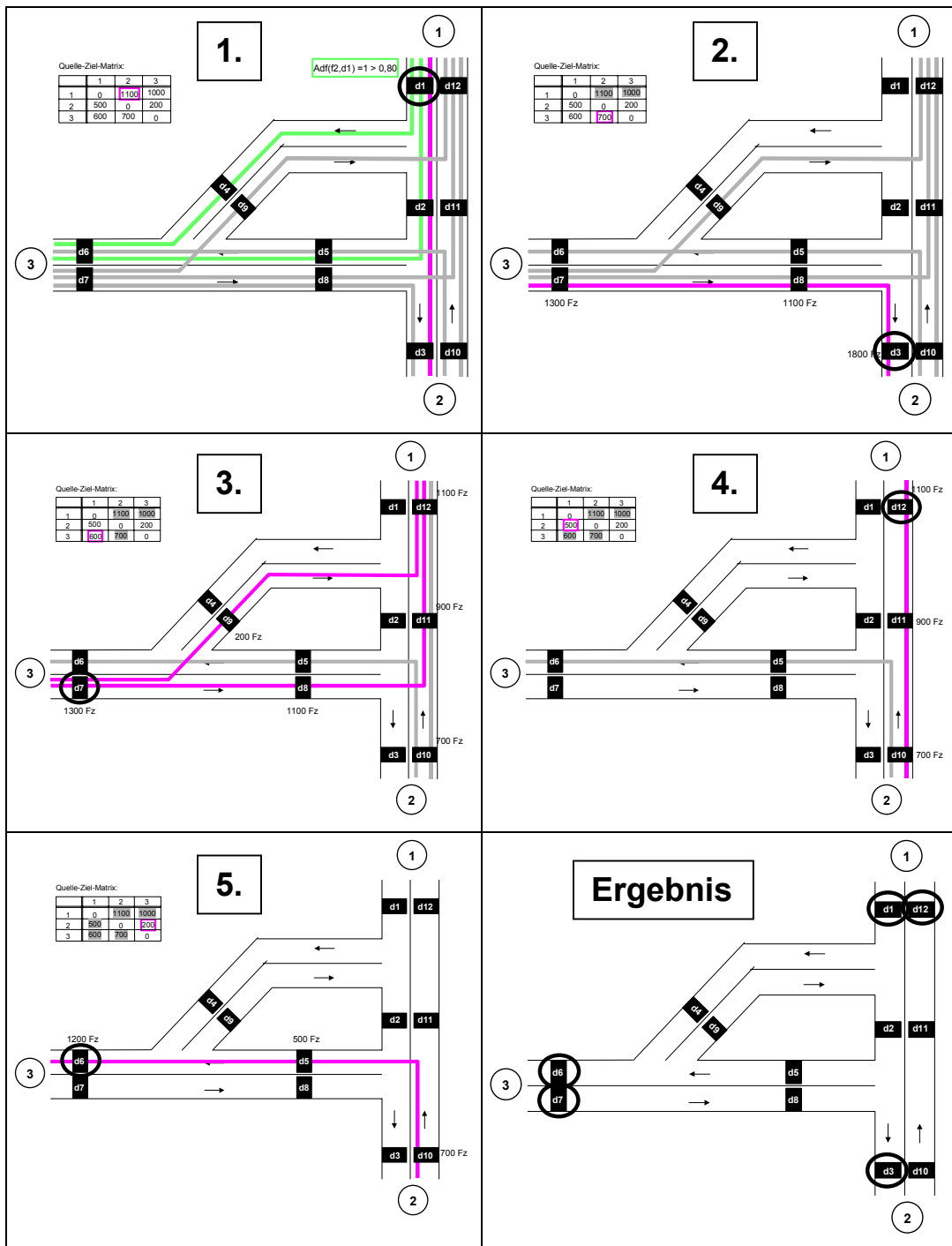


Bild 27: Auswahlregel „OD-Elimination“ am Beispiel aus Bild 19

Auswahlregel „Routen-Elimination“

Erforderliche Eingangsparameter:

- Historische Quelle-Ziel-Matrix ,
- Erwartungs-Verkehrsstärke an allen möglichen Detektorstandorten (aus Umlegung historischer Matrix oder anderen Quellen),
- Anteil des Detektors an der Quelle-Ziel-Matrix (A_{df}) aus Anteilsmatrix,
- Anteil der Route am Detektor aus vorangegangener Umlegung.

Bei der Auswahlregel „Routen-Elimination“ ist zusätzlich zu den bisher erforderlichen Eingangsparametern der Anteil der Routen an einem Detektor hinzuzuziehen. Diese sind aus einer Umlegung der historischen Matrix zu ermitteln.

INPUT: f_i = Nummer der OD-Beziehung d_j = Nummer des Detektors r_k = Nummer der Route $q(r_k, d_j)$ = Belastung der Route r_k über Detektor d_j $A_{fd}(f_i, d_j) = q(f_i, d_j) / q(d_j)$ $A_{df}(f_i, d_j) = q(f_i, d_j) / q(f_i)$	$q(f_i)$ = Belastung der OD-Beziehung f_i $q(d_j)$ = Belastung des Detektors d_j $q(r_k)$ = Belastung der Route r_k $g1(f_i, d_j) = q(f_i, d_j) / \max q_f$ $g2(f_i, d_j) = 1$ (gewählt)
DO UNTIL $\sum (q(d_j)^{red}) = 0$ (alle Detektoren abgedeckt)	
SELECT d_j WHERE $q(d_j)$ [optional (* g2)] \rightarrow max	
ADD d_j to $\{d_{Auswahl,1}, \dots\}$	
FOR EACH r_k WHERE $q(r_k, d_{Auswahl}) > 0$ (für alle Routen über den Detektoren)	
FOR EACH d_j WHERE $q(r_k, d_j) > 0$ (für alle Detektoren auf dieser Route)	
$q(d_j)^{red} = q(d_j) - q(r_k, d_j)$	
OUTPUT: Detektorsatz = $\{d_{Auswahl,1}, \dots\}$	

Bild 28: Auswahlregel „Routen-Elimination“ (Struktogramm)

Zunächst wird der Detektor mit der höchsten Belastung ausgewählt und der Menge der ausgewählten Detektoren hinzugefügt. Dann wird überprüft, welche Routen durch diesen Detektor bereits abgedeckt sind.

Für jede dieser Routen werden danach die auf der jeweiligen Route liegenden Detektoren um den Betrag der Routenbelastung reduziert.

Wird dann bei der nächsten Schleife wieder der Detektor mit der höchsten Belastung ausgewählt, werden die modifizierten Belastungen angesetzt. Das hat zur Folge, dass der nächste ausgewählte Detektor immer entsprechend den noch verbleibenden Routen bestimmt wird. Diese Routine wird wiederholt, bis alle Routen eliminiert sind (**Bild 28**).

In **Bild 29** ist die Auswahlregel am Beispiel in **Bild 19** dargestellt.

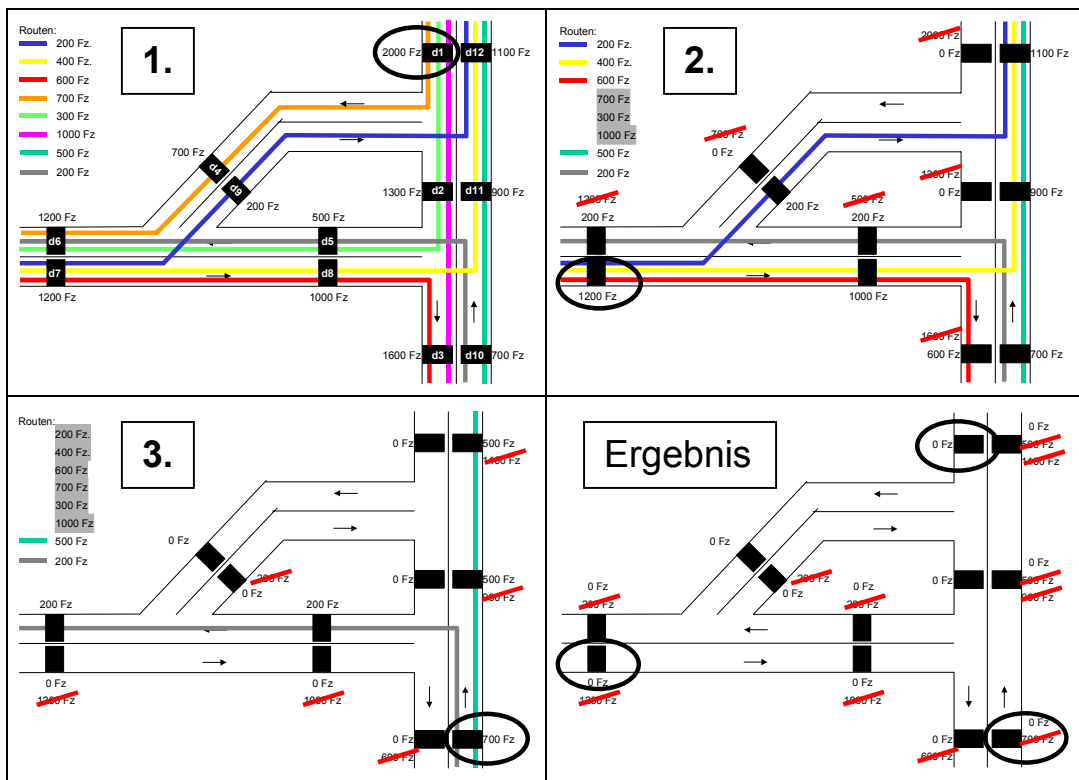


Bild 29: Auswahlregel „Routen-Elimination“ am Beispiel aus **Bild 19**

Yang / Zhou (1998) kommen bei der Lösung des Optimierungsproblems $\min \rightarrow \text{MPRE}(\lambda) = \max G(\lambda)$ mit $\sum_{w \in W} p_{aw} \cdot t_w \cdot \lambda_w = 0$, $a \in \hat{A}$ zu der gleichen Schlussfolgerung (**Kapitel 3**), die damit durch den hier gewählten iterativen Ansatz unterstützt wird.

4.6 Verfahren basierend auf der Bewertung mit Einbeziehung des Schätzergebnisses

Bei der Auswahl von Detektoren mit Einbeziehung des Schätzergebnisses wird zur Definition eines Detektorsatzes der Abweichungsparameter (mittleres Fehlerquadrat der Abweichungen der Schätz-Matrix von der Soll-Matrix) direkt als Bewertungsgrundlage herangezogen (vgl. **Bild 17**). Dies bedeutet, dass für jeden zu bewertenden Detektorsatz eine Anpassung der Quelle-Ziel-Matrix erfolgen muss.

Um den Rechenaufwand im realisierbaren Bereich zu halten, wurde für den Referenzfall ein Konstruktionsverfahren mit abnehmendem Freiheitsgrad gewählt, das ohne Vorausschauregeln immer nur einen Ast in die nächste Stufe weiterführt. In jeder Stufe der sich aufbauenden Baumstruktur, bei der sich die Anzahl der ausgewählten Detektoren um einen erhöht, wird derjenige Detektor zusätzlich ausgewählt, der geringsten Abweichungszuwachs erreicht (**Bild 30**).

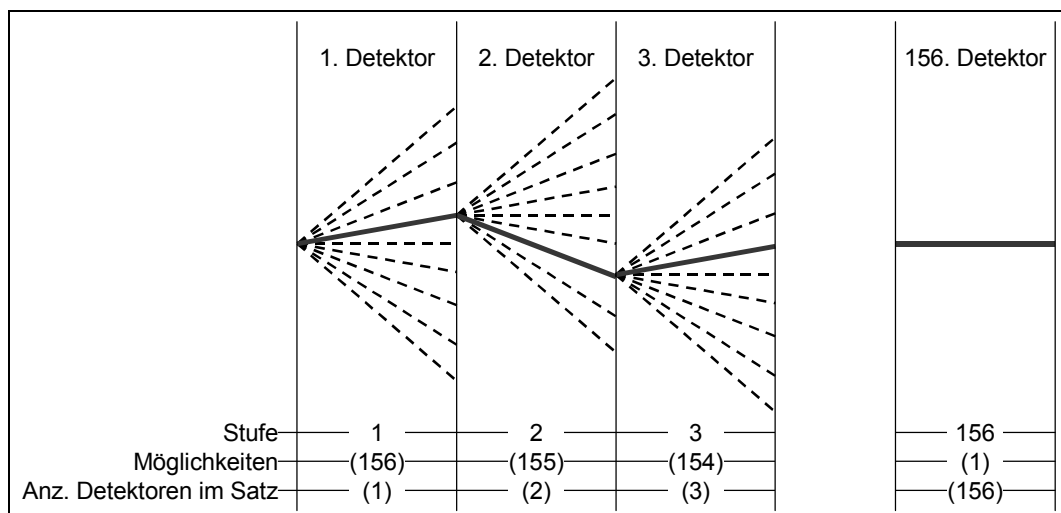


Bild 30: Konstruktionsverfahren mit abnehmenden Freiheitsgrad

Bei einem solchen Verfahren sind für das vorliegende Testgebiet (**Abschnitt 5.1**) immer noch $\sum_{k=1}^{156} k = 12.256$ Möglichkeiten zu überprüfen, wenn tatsächlich bis zu einer maximalen Detektorsatzgröße von 156

bewertet werden soll. Es erscheint allerdings sinnvoll, den Vergleich vorher abzurechnen.

Der im optimalen Fall zu erwartende Verlauf des mittleren Fehlerquadrats der Abweichungen der Schätz-Matrix von der Soll-Matrix bei zunehmender Anzahl von Detektoren ist in **Bild 31** dargestellt. Ab einer gewissen Anzahl von Detektoren konvergiert der Verlauf, das heißt jeder dann noch hinzugefügte Detektor verringert die Abweichung nur noch minimal. An dieser Stelle kann die Bewertung abgebrochen werden.

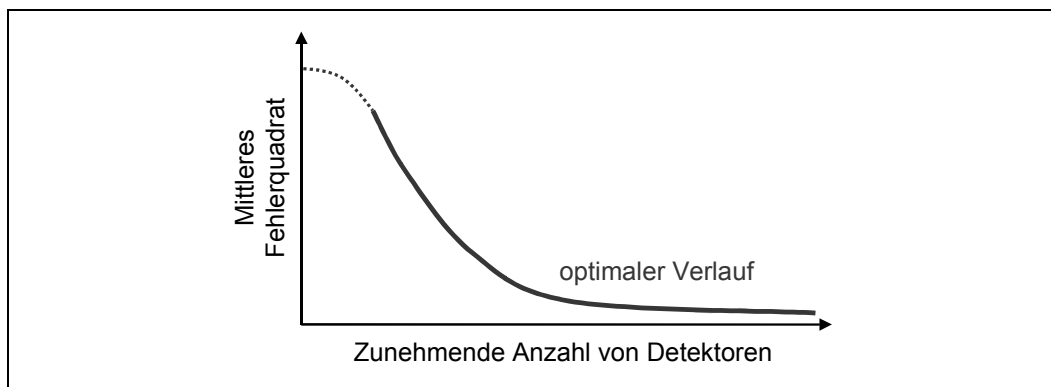


Bild 31: Erwarteter optimaler Verlauf des mittleren Fehlerquadrats

Erforderliche Eingangsgrößen des Verfahrens sind:

- Historische Quelle-Ziel-Matrix ,
- Erwartungs-Verkehrsstärke an allen möglichen Detektorstandorten (aus Umlegung historischer Matrix oder anderen Quellen),
- Soll-Matrix, welche die zu erreichende Quelle-Ziel-Matrix darstellt (muss im Vorfeld definiert werden, siehe **Abschnitt 5.1.5**)
- Soll-Verkehrsstärke an allen möglichen Detektorstandorten (aus Umlegung Soll-Matrix).

Zunächst wird der erste Detektor aus der Menge aller möglichen Detektoren der Menge der ausgewählten Detektoren vorläufig hinzugefügt. In der ersten Stufe befindet sich nur ein Detektor im Satz.

Dann wird mit den Werten der zu diesem Zeitpunkt ausgewählten Detektoren und der alten Datenbasis unter Einsatz eines Schätz-

verfahrens die neue Matrix geschätzt. Anschließend wird die Differenz der geschätzten Matrix und der – in der Realität unbekannt – neuen Soll-Matrix bestimmt und der Abweichungsparameter berechnet (Vorgehensweise siehe auch **Bild 3**).

Der Abweichungsparameter wird in der Datenbank abgelegt und der gerade hinzugefügte Detektor wird wieder aus der Menge der ausgewählten Detektoren entfernt. Dies wird solange wiederholt bis alle Detektoren, die noch nicht endgültig ausgewählt wurden, auf diese Weise bewertet wurden. In der ersten Stufe sind das alle 156 Detektoren. Abschließend wird der Detektor mit dem höchsten Abweichungsparameter endgültig der Menge der ausgewählten Detektoren hinzugefügt. Diese Arbeitsschritte werden mit den noch nicht ausgewählten Detektoren solange wiederholt, bis alle Detektoren endgültig ausgewählt sind oder ein vorher definiertes Abbruchkriterium erreicht wurde.

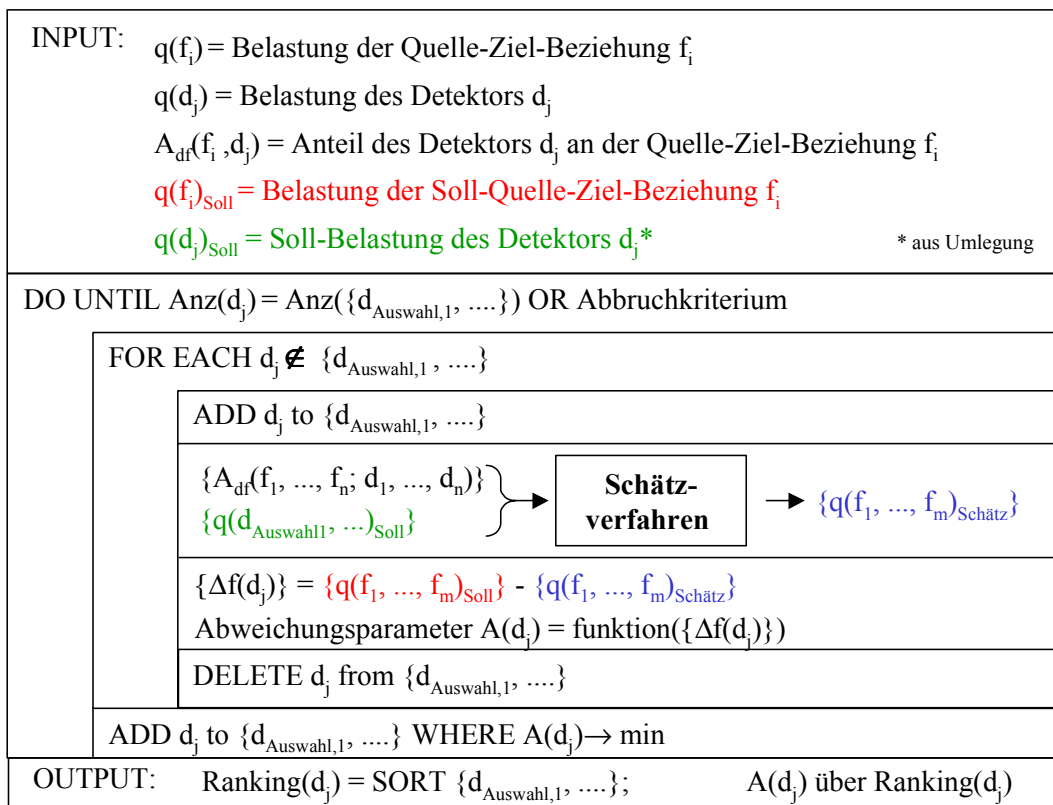


Bild 32: Auswahlregel mit Einbeziehung des Schätzergebnisses (Struktogramm)

Das Ergebnis der Bewertung ist die Rangfolge der ausgewählten Detektoren und deren Abweichungsparameter. Mit diesem Verfahren lässt sich folglich unter Berücksichtigung der Randbedingungen ein Detektorsatz aus der optimalen Rangfolge von Detektoren ableiten.

5. Aufbau einer Bewertungsumgebung

5.1 Beschreibung des Testgebiets

5.1.1 Auswahlkriterien

Bei der Auswahl eines geeigneten Testgebiets standen im wesentlichen die folgenden Auswahlkriterien im Vordergrund:

- Hoher Nutzen aus der Kenntnis der Verkehrssituation,
- Bestandteil des innerstädtischen Straßennetzes,
- mangelhafte derzeitige Ausstattung mit Detektoren,
- überschaubare Netzgröße,
- Überlagerung verschiedener Verkehrszwecke durch Wohnen, Arbeiten und Veranstaltungen,
- teilweise gemeinsame Nutzung des Straßenraums durch öffentlichen Verkehr (Bus, Straßenbahn) und motorisierten Individualverkehr sowie
- keine kurz- bis mittelfristige Planung von größeren Veränderungen im Straßenraum und der Verkehrsführung.

5.1.2 Lage im Raum

Es wurde das Gebiet Niederrad / Sachsenhausen südlich des Mains in der Stadt Frankfurt am Main ausgewählt (**Bild 33**).

Das Testgebiet wird im Norden durch den Main und im Westen durch die Bundesautobahn BAB 5 begrenzt. Es erstreckt sich nach Osten bis zur Friedensbrücke und nach Süden bis zum Knotenpunkt Oberforsthaus.

5.1.3 Vorhandene Datenbasis

Für das ausgewählte Gebiet existieren keine historischen Daten. Die vorhandenen Detektoren werden ausschließlich lokal zur Verkehrssteuerung verwendet und nicht in die Verkehrsleitzentrale durchgeschaltet. Einzig aus der Verkehrsdatenbasis Rhein-Main (VDRM) lassen

sich die erforderlichen Grundlagen zum Aufbau einer synthetischen Untersuchungsumgebung ableiten.

5.1.4 Definition des strategischen Netzes

In Abstimmung mit Verkehrsexperten der Stadt Frankfurt am Main und unter Berücksichtigung des Netzes der VDRM wurde das in **Bild 34** dargestellte strategische Netz definiert.

Das Netz wurde mit **70 Knoten** und **156 Kanten** für das makroskopische Verkehrsprogramm VISUM (PTV AG) kodiert. In Anlehnung an die VDRM wurden **21 Verkehrszellen (Quell- und Zielbezirke)** definiert und an das strategische Netz angebunden.

In **Bild 35** und **Bild 36** sind die Verkehrszellen räumlich dargestellt. Neben den 12 Kordonzellen, die die Grenze des Testgebiets zum Umland beschreiben, gibt noch 9 Binnenzellen innerhalb des Testgebiets. Keine der Verkehrszellen wird direkt an einen Knoten angebunden, sondern nur über Kanten an den Knoten geführt.

In **Bild 35** und **Bild 36** sind ebenfalls die Verkehrsstärken auf den strategischen Netzabschnitten für die Vormittagsspitze (7:00-8:00 Uhr) und Nachmittagsspitze (16:00-17:00 Uhr) dargestellt. Hierbei werden die Hauptverkehrsrichtungen im Vormittags- und Nachmittagsverkehr deutlich.

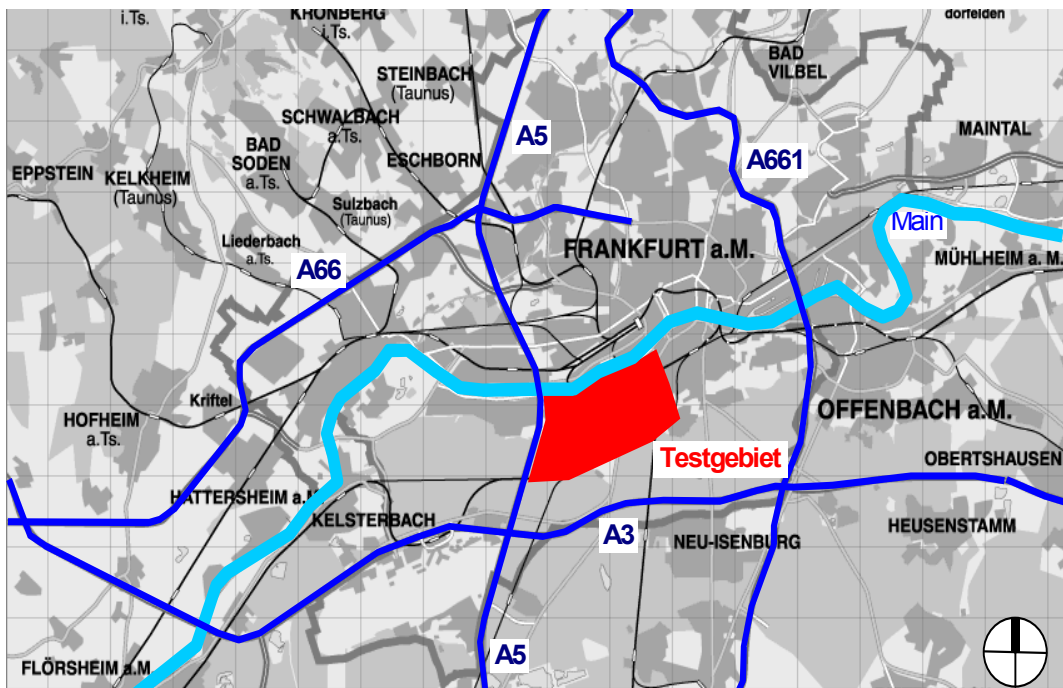


Bild 33: Räumliche Lage des Testgebiets

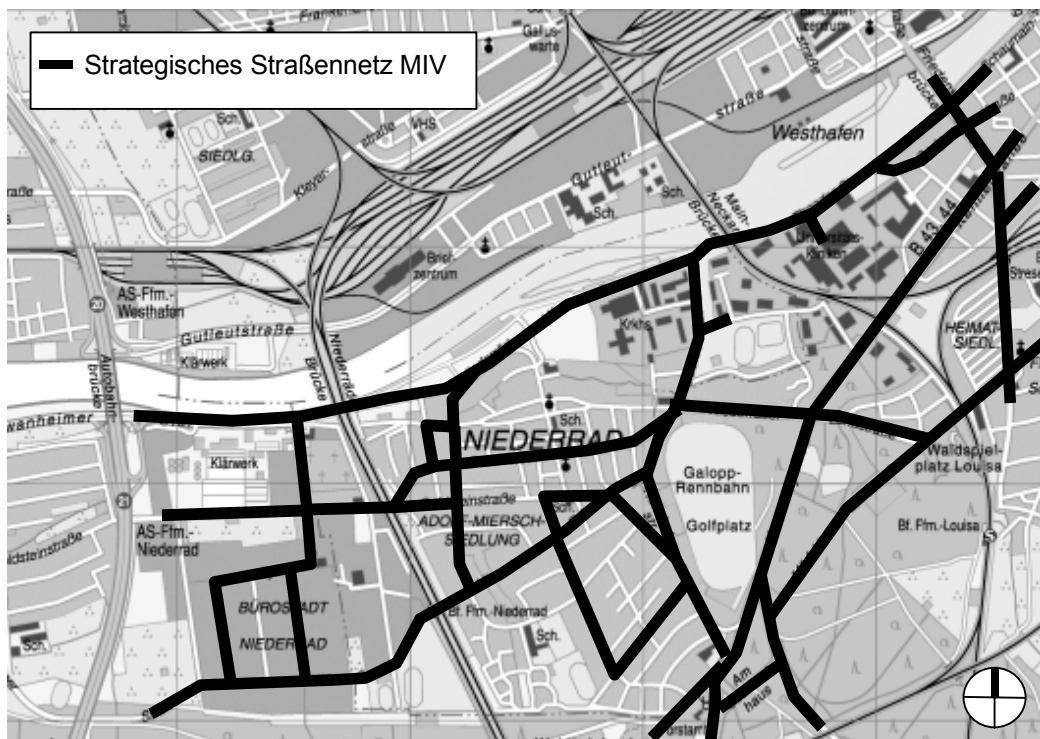


Bild 34: Strategisches Straßennetz (MIV) im Testgebiet

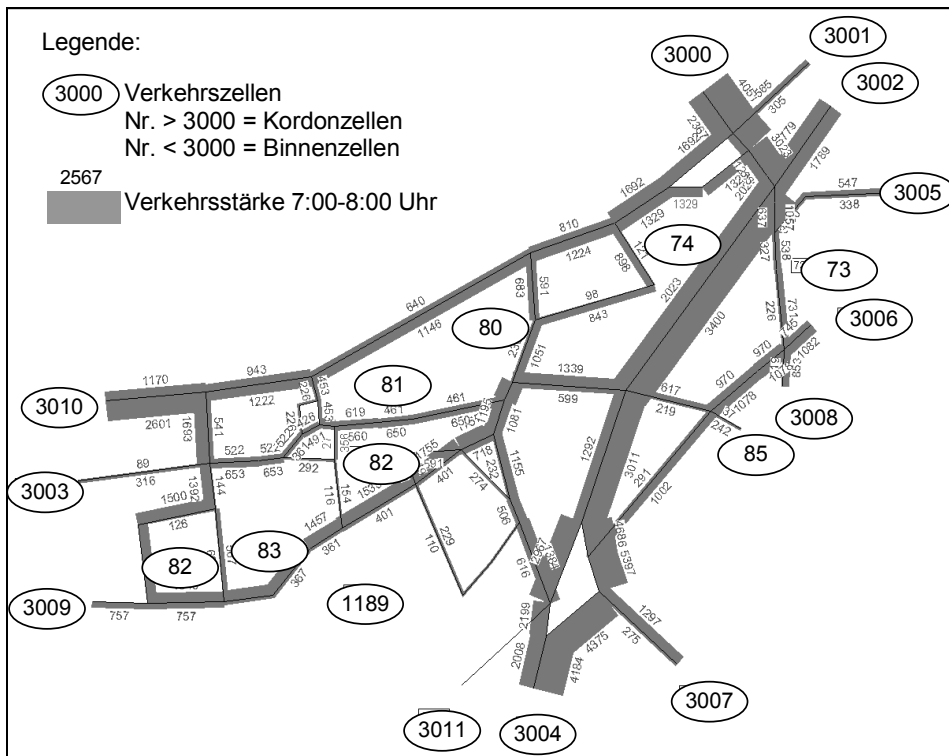


Bild 35: Verkehrszellen und Verkehrsstärke 7:00 bis 8:00 Uhr

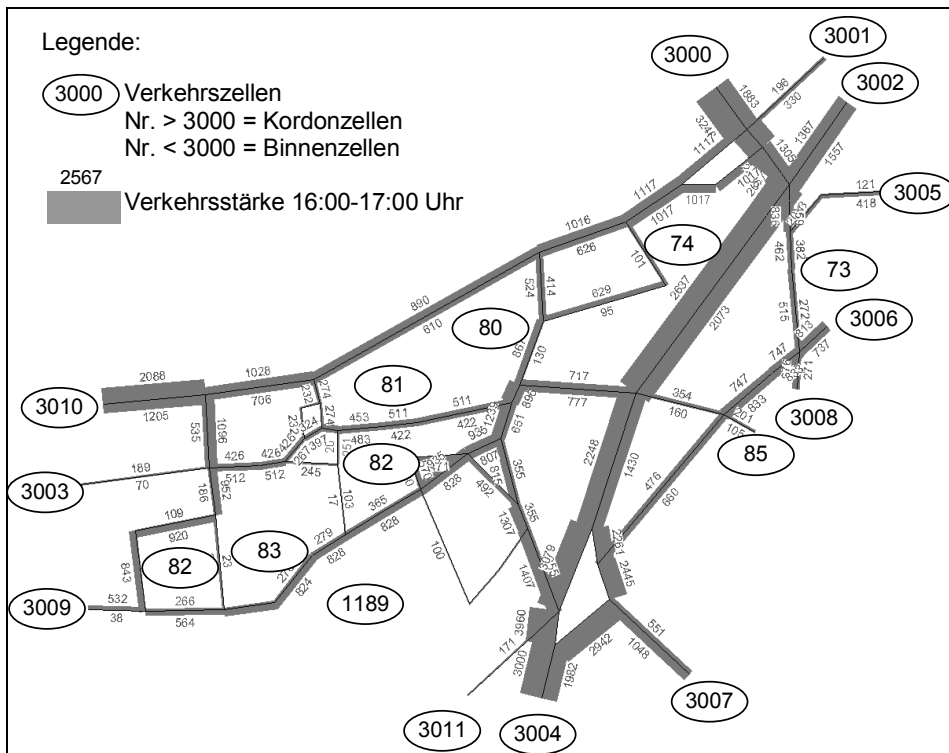


Bild 36: Verkehrszellen und Verkehrsstärke 16:00 bis 17:00 Uhr

5.1.5 Bestimmung der zu untersuchenden Quelle-Ziel-Matrizen

Aus der VDRM wird die für das Teilnetz generierte Quelle-Ziel-Matrix der Stundengruppe 7:00 bis 8:00 Uhr als Grundlagenmatrix (vormittags) und die Stundengruppe 16:00 bis 17:00 Uhr Grundlagenmatrix (nachmittags) festgelegt.

Um die Abhängigkeit der Untersuchungsergebnisse von den definierten Matrizen zu überprüfen, werden vier virtuelle Soll-Matrizen durch Variation der Quelle-Ziel-Matrix für die Stundengruppe 7:00 bis 8:00 Uhr mittels eines Zufallsgenerators aus der VDRM generiert (**Bild 37**). Dabei werden Soll-Matrizen ermittelt, die in einem Intervall von +/-5%, +/-10%, +/-20% und +/-100% von der Grundmatrix abweichen. Diese werden in Ermangelung realer Werte als synthetische Testumgebung verwendet.

Die so ermittelten Quelle-Ziel-Matrizen sind in **Anlage 1** dargestellt. Zur Interpretation des Unterschieds zwischen den virtuellen Quelle-Ziel-Matrizen und der Grundmatrix sind dort ebenfalls diese Differenzen grafisch aufgetragen.

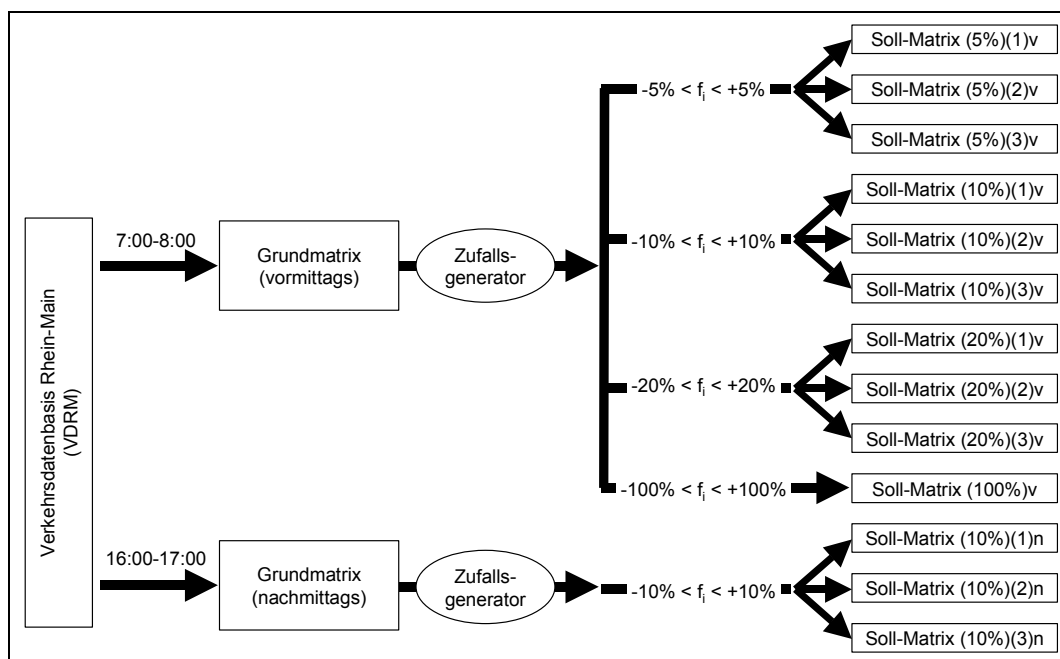


Bild 37: Bestimmung der zu untersuchenden Quelle-Ziel-Matrizen

5.2 Versuchsplan

5.2.1 Abhängigkeiten und Randbedingungen bei der Definition der Detektorsätze

Die Definition der Detektorsätze hängt nicht allein von den Auswahlregeln ab. In den vorangegangenen Kapiteln wurden die unterschiedlichen Indikatoren und Einflussfaktoren dargestellt. Im einzelnen sind dies

- die entwickelten Auswahlverfahren selbst (**Kapitel 4**),
- die definierten indirekten Gewichtungparameter (**Abschnitt 4.3**),
- das zugrunde gelegte Netz (**Abschnitt 5.1**),
- die Grundlage-Matrizen (**Abschnitt 5.1.5**) und
- die verwendeten Routensuch- und Umlegungsverfahren (**Abschnitt Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Die anschließende Bewertung der definierten Detektorsätze hängt zusätzlich noch ab von

- den Soll-Matrizen (**Abschnitt 5.1.5**),
- dem verwendeten Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren (**Abschnitt 2.5.3**) und
- dem definierten Abweichungsparameter (**Abschnitt 4.6**).

Aus diesen Randbedingungen können 30 verschiedene, sinnvolle Versuche abgeleitet werden. Diese sind in **Anlage 4** dargestellt.

5.2.2 Versuchsaufbau zur vergleichenden Bewertung der Kriterien Anzahl der Detektoren und Abweichung der Matrix

In **Bild 38** ist der prinzipielle Aufbau des Versuchs zur Bewertung der Detektoranzahl und erreichten Abweichung der Quelle-Ziel-Matrix durch die definierten Auswahlverfahren dargestellt. Dieser Versuch basiert auf der Umlegung der Grundmatrix mit dem Gleichgewichtsverfahren. Auf dieser Grundlage werden die zu vergleichenden Auswahlregeln ange-

wendet und Detektorsätze definiert. Die so ermittelten Detektorsätze werden hinsichtlich der Detektoranzahl und Lage verglichen. Die Werte jedes Detektors im Satz werden aus der mit dem Gleichgewichtsverfahren umgelegten Soll-Matrix ermittelt und fließen zusammen mit der Grundmatrix die Schätzung mit VStromFuzzy ein. Hier wird der zweite Vergleich der Abweichungen der geschätzten Matrizen von der eingesetzten Soll-Matrix durchgeführt.

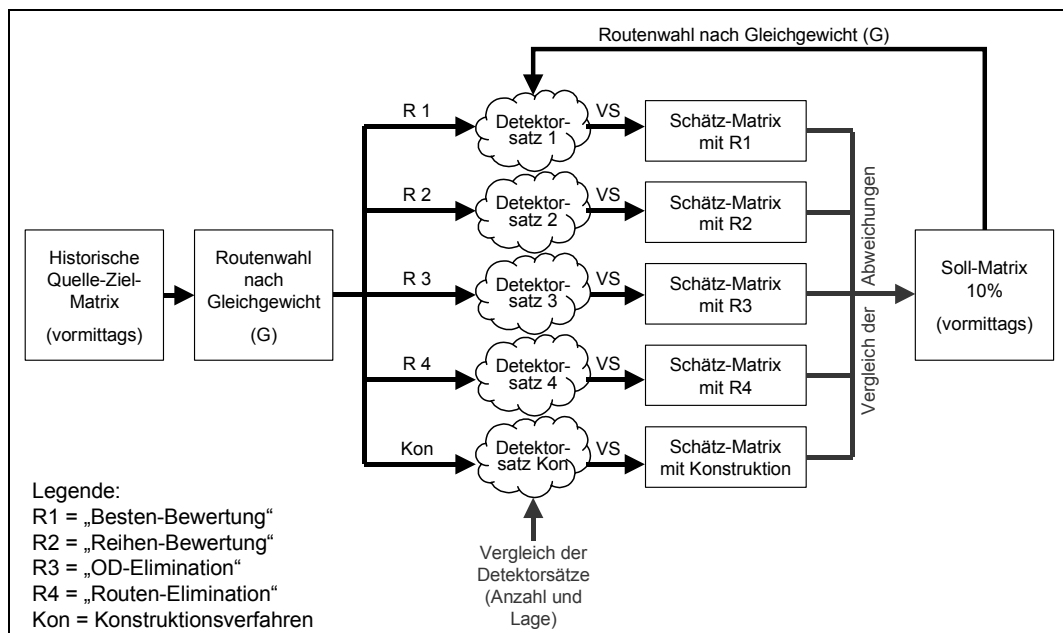


Bild 38: Versuchsaufbau zur vergleichenden Bewertung der Detektor-Auswahlverfahren

5.2.3 Versuchsaufbau zur Überprüfung des Einflusses der Routensuch- und Umlegungsverfahren

Um den Einfluss der Routensuch- und Umlegungsverfahren zu überprüfen, wird der in **Bild 38** dargestellte Versuch auch für das Lernverfahren wiederholt. Zusätzlich werden die ermittelten Detektorsätze wechselweise mit dem anderen Verfahren eingesetzt. Der auf der Grundlage des Gleichgewichtsverfahrens definierte Detektorsatz wird im Modell mit Lernverfahren betrieben und umgekehrt.

Inwieweit diese Randbedingung in der Praxis von Relevanz ist, wird in **Abschnitt 6.3.1: Gewichtung der Randbedingungen** diskutiert.

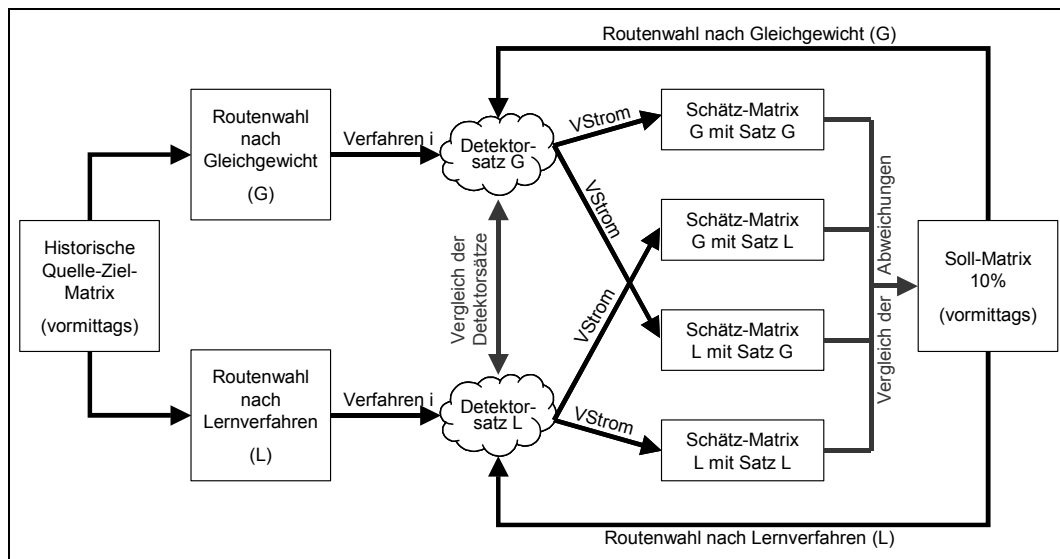


Bild 39: Versuch zur Überprüfung des Einflusses der Routensuch- und Umlegungsverfahren

Der Versuch basiert wiederum auf der Grundmatrix. Diese wird sowohl mit dem Gleichgewichtsverfahren als auch mit dem Lernverfahren umgelegt. Dann wird mit den einzelnen Verfahren auf den Ergebnissen der beiden Umlegungen jeweils ein Detektorsatz bestimmt. Mit dem Detektorsatz G aus dem Gleichgewichtsverfahren wird nun zunächst eine Matrix geschätzt deren Input "neue" Detektorwerte durch Umlegung der Soll-Matrix ebenfalls mit dem Gleichgewichtsverfahren ermittelt wurden. Danach wird der selbe Detektorsatz G mit Werten aus der Umlegung der Soll-Matrix mit dem Lernverfahren gespeist. Die gleiche Prozedur wird mit dem Detektorsatz L wiederholt.

Anschließend wird sowohl die ermittelte Anzahl an Detektoren als auch die Abweichungen der Schätz-Matrix von der Soll-Matrix miteinander verglichen. Weichen beide Kriterien nicht sehr voneinander ab, kann der Einfluss des Routensuch- und Umlegungsverfahrens als gering eingestuft werden.

5.2.4 Versuchsaufbau zur Überprüfung des Einflusses der Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren

Zur Überprüfung des Einflusses der Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren wird die Schätzung der Matrix mit dem ermittelten Detektorsatz sowohl mit VStromFuzzy als auch mit dem PFE durchgeführt, und die Abweichungen werden verglichen (**Bild 40**).

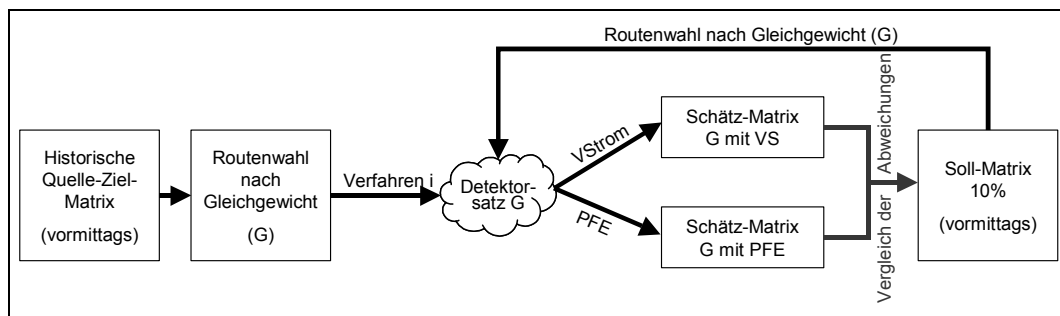


Bild 40: Versuch zur Überprüfung des Einflusses der Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren

Bei diesem Versuch wird ein auf der Grundlage einer Gleichgewichtsumlegung mit jedem Verfahren bestimmter Detektorsatz mit Input "neuen" Detektorwerten aus der Gleichgewichtsumlegung der Soll-Matrix versorgt. Danach wird eine neue Matrix sowohl mit VStromFuzzy (VS) als auch mit Path Flow Estimator (PFE) bestimmt.

Abschließend werden die Abweichungen der Schätz-Matrix (VS) mit der Soll-Matrix und die Abweichungen der Schätz-Matrix (PFE) mit der Soll-Matrix miteinander verglichen. Weichen beide Abweichungen nicht wesentlich voneinander ab, kann der Einfluss des Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahrens als gering eingestuft werden.

5.2.5 Versuchsaufbau zur Überprüfung des Einflusses der Soll-Matrizen

Zur Überprüfung des Einflusses der Soll-Matrizen wird ein Detektorsatz mit unterschiedlichen Zählwerten aus den Soll-Matrizen (**Abschnitt 5.1.5**)

mit VStromFuzzy zur Schätzung verwendet, und die Abweichungen werden vergleichend bewertet.

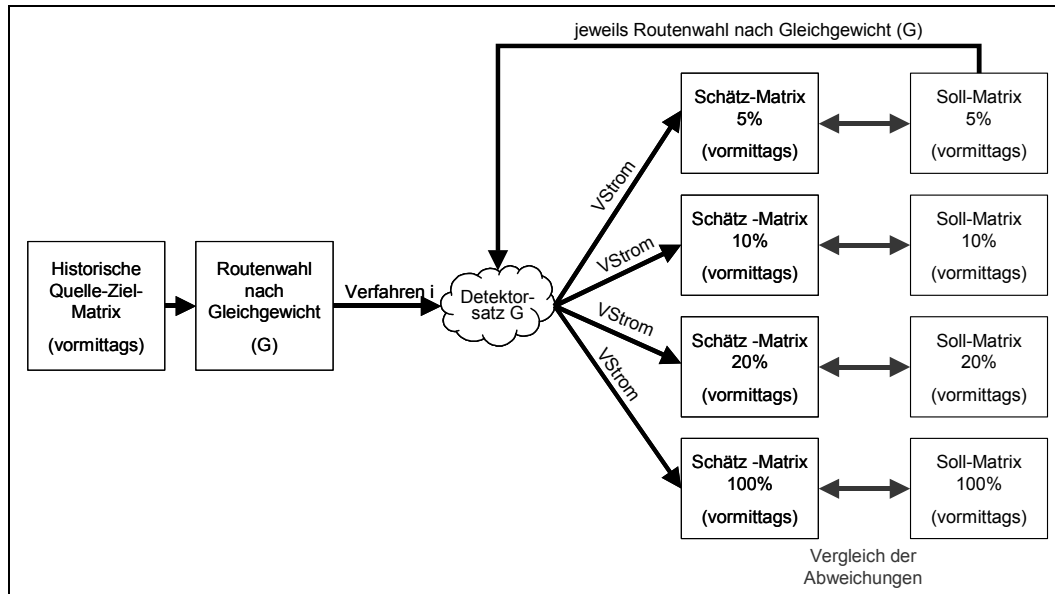


Bild 41: Versuch zur Überprüfung des Einflusses der zugrunde gelegten Soll-Matrizen

Dieser Versuch wird auf der Basis einer Gleichgewichtsumlegung der Grundmatrix und mit jedem Verfahren bestimmten Detektorsatz durchgeführt.

Unter Einsatz von VStromFuzzy und Input "neuen" Detektorwerten aus einer Gleichgewichtsumlegung der Soll-Matrizen im Intervall +/-5%, +/-10%, +/-20% und +/-100% werden anschließend Schätzmatrizen bestimmt.

Über den Vergleich Abweichungen dieser Schätz-Matrizen von den jeweiligen Soll-Matrizen kann der Einfluss der Soll-Matrizen bewertet werden.

5.3 Entwicklung eines Programms zur Durchführung des Versuchsplans

5.3.1 Aufgabe des Programms ODeFIX

Es hat sich als sinnvoll herausgestellt, die verschiedenen Regeln zur Auswahl von Detektoren zur Quelle-Ziel-Matrix-Anpassung in einem eigenen Programm umzusetzen, um sie auch für andere Netze und Planfälle praktisch nutzbar zu machen. Das Programm ODeFIX ist ein Werkzeug für die vergleichende Untersuchung verschiedener Auswahlverfahren von Detektoren. Weiterhin erlaubt ODeFIX das Testen und Bewerten der Qualität von Detektorsätzen, die aus externen Quellen zusammengestellt wurden (beispielsweise durch ortskundige Experten) sowie das Vervollständigen eines bereits existierenden Detektorsatzes. Die sinnvollen Auswertungsmethoden, wie das Darstellen des Abweichungsverlaufs bei zunehmender Anzahl von Detektoren und die geographische Darstellung der ausgewählten Detektoren, sind ebenfalls in ODeFIX umgesetzt worden. ODeFIX wurde in der Programmiersprache Visual Basic Professional entwickelt.

Zur Zeit existieren Schnittstellen zu VISUM bzw. VISUM*online* (PTV AG)¹³, da in beiden Programmen die zugrunde gelegten Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren und Routensuch- und Umlegungsverfahren implementiert sind. ODeFIX kann bereits ohne Probleme auch andere Netze bearbeiten, für welche die Datenbasis in diesem Format vorliegt. Weiterhin wurde eine Schnittstelle zum Datenbankprogramm Microsoft ACCESS programmiert, das zur Aufbereitung, Auswertung und Darstellung der Ergebnisse dient. ODeFIX ist offen für weitere Schnittstellen und zukünftige Entwicklungen im Bereich der Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren.

¹³ VISUM und VISUM*online* verfügen über die gleichen Grundfunktionalitäten bei der Umlegung. In VISUM ist das Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren VstromFuzzy integriert, in VISUM*online* ist es der Path Flow Estimator. Deshalb kommen hier beide Programme zum Einsatz.

ODeFIX ist sehr viel umfangreicher als es ein späterer praktischer Einsatz erfordert, denn in ihm sind alle hier untersuchten Auswahlregeln umgesetzt. Für den praktischen Einsatz kann die gewählte Auswahlregel später als eigenständiger Programmteil isoliert werden. Im jetzigen Stadium ist ODeFIX ein Werkzeug für Forschungszwecke. Die Programmbestandteile sind in **Anlage 5** erläutert.

5.3.2 Systemvoraussetzungen und eingesetzte Software

Die notwendigen Berechnungen wurden auf einem handelsüblichen PC, Pentium mit 2x450 MHz und 256 RAM, durchgeführt, der unter Windows NT 4.0 betrieben wurde. Alle Aussagen über Rechenzeiten und Aufwände sind vor diesem Hintergrund zu beurteilen.

Die Programmierung von ODeFIX wurde in der Programmiersprache Microsoft Visual Basic für 32-bit Windows-Entwicklung in der Version 6.0 durchgeführt. Zur Verwaltung der Daten wurde das Datenbankprogramm Microsoft ACCESS in der Version 97 verwendet.

Als Fachsoftware wurde das makroskopische Verkehrsprogramm VISUM, in der Version 7.0 mit den Zusatzmodulen Teilnetzgenerator, VStromFuzzy und der COM-Schnittstelle, sowie VISUM*online* in der Version 0.42 (VISUM 6.51) mit dem zusätzlichen Zusatzmodul Path Flow Estimator (PTV AG) eingesetzt.

6. Bewertung der Auswahlverfahren

6.1 Bewertung der ermittelten Anzahl der Detektoren

Die definierten Verfahren können hinsichtlich der Ermittlung der Anzahl von Detektoren in zwei Gruppen unterteilt werden:

- Verfahren, die eine Rangfolge ermitteln,
- Verfahren, die eine Anzahl an Detektoren ermitteln.

In **Bild 42** sind die ermittelten Detektoranzahlen nach den Auswahlregeln aufgetragen. Alle Läufe wurden mit einer Umlegung der Grundmatrix nach Gleichgewichtsverfahren und nach Lernverfahren durchgeführt. Die Beschreibung des Versuchsaufbaus ist in **Abschnitt 5.2.2** beschrieben.

Da mit der Auswahlregel der "Besten-Bewertung" (R1) immer nur der beste Detektor für jede Quelle-Ziel-Beziehung bewertet wird, kann eine absolute Anzahl an ausgewählten Detektoren bestimmt werden. Jedoch ist diese in der Regel höher als die der Auswahlverfahren mit Elimination (im Testnetz 64 Detektoren gegenüber 21 bzw. 30 Detektoren), da die Redundanz von Detektoren nicht beachtet wird. Aus diesem Grund kann die "Besten-Bewertung" noch zu den Rangfolge-Ergebnissen gezählt. Die "Besten-Bewertung" wurde mit unterschiedlichen Kombinationen von Indikatoren durchgeführt, die jedoch keinen Einfluss auf die ermittelte Anzahl an Detektoren hatten (**Bild 42**). In der **Anlage 6** sind die mit der "Besten-Bewertung" ermittelten Standorte dargestellt.

Die Auswahlregel der „Reihen-Bewertung“ (R2) bewertet jeden einzelnen Detektor anhand seiner Indikatoren und sortiert die möglichen Detektorstandorte entsprechend dieser Bewertung. Mit der „Reihen-Bewertung“ kann keine absolute Anzahl an Detektoren ermittelt werden. Auch die "Reihen-Bewertung" wurde mit unterschiedlichen Kombinationen von Indikatoren durchgeführt (**Bild 42**). In der **Anlage 6** sind die mit der "Reihen-Bewertung" ermittelten Standorte dargestellt.

Mit der Auswahlregel „OD-Elimination“ (R3) wird eine Anzahl von 30 Detektoren bei Gleichgewichtsverfahren und 32 Detektoren bei Lernverfahren ermittelt.

Die Auswahlregel „Routen-Elimination“ (R4) definiert 21 Detektorstandorte bei Gleichgewichtsverfahren und 22 Detektorstandorte bei Lernverfahren .

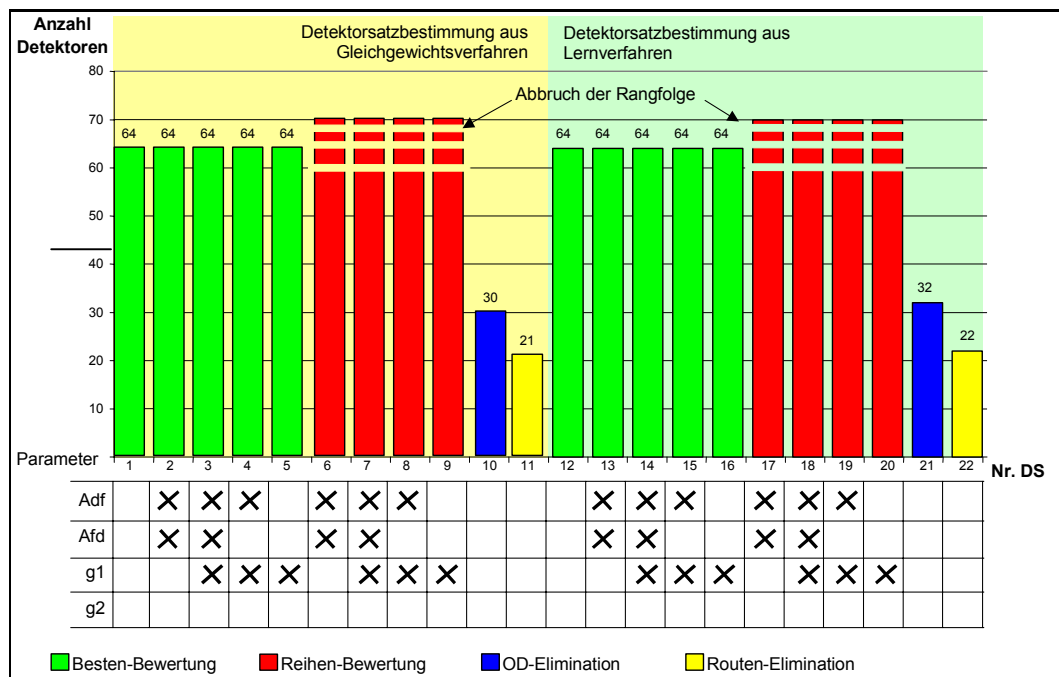


Bild 42: Anzahl der ermittelten Detektoren – Vergleich der Auswahlverfahren (Abkürzungen siehe **Anlage 9**)

Aufgrund des Bewertungskriteriums Anzahl der Detektoren schneidet die "Routen-Elimination" mit einer Anzahl von etwa 13% der möglichen Standorte am besten ab. Die "OD-Elimination" erreicht dabei etwa 19%.

In der **Anlage 6** sind die Detektorstandorte im Netz geografisch dargestellt.

6.2 Bewertung der Abweichung der geschätzten Quelle-Ziel-Matrix

Der Beitrag eines Detektorsatzes bei der Quelle-Ziel-Matrix-Anpassung wird mit Hilfe des Abweichungsparameters A1 (mittleres Fehlerquadrat)

verglichen (**Anlage 1**). Hierbei werden wiederum die gleichen Versuche wie bei der Bestimmung der Anzahl durchgeführt (**Bild 43**). Die Beschreibung des Versuchsaufbaus ist in **Abschnitt 5.2.2** beschrieben.

Als Vergleichsgrundlage werden aus den Rangfolgen der Verfahren "Besten-Bewertung" und "Reihen-Bewertung" die besten 21 Detektoren ausgewählt. Für "OD-Elimination" und "Routen-Elimination" wird die jeweils ermittelte absolute Anzahl herangezogen.

Die Auswahlregel "Besten-Bewertung" (R1) wird mit unterschiedlicher Kombination von Indikatoren untersucht. Dabei kann sowohl bei der Gleichgewichtsgrundlage als auch beim Lernverfahren festgestellt werden, dass die Detektorsätze (DS1, D2, DS12, DS13) mit Regeln ohne den Gewichtungsparmeter g_1 , der die Quelle-Ziel-Beziehung gewichtet, die schlechtesten Ergebnisse erzielen. Die jeweils 3 Detektorsätze mit g_1 erreichen etwa ähnliche Abweichungen, so dass rückgeschlossen werden kann, dass bei der "Besten-Bewertung" der Gewichtungsparmeter g_1 als Indikator zur Bewertung ausreicht.

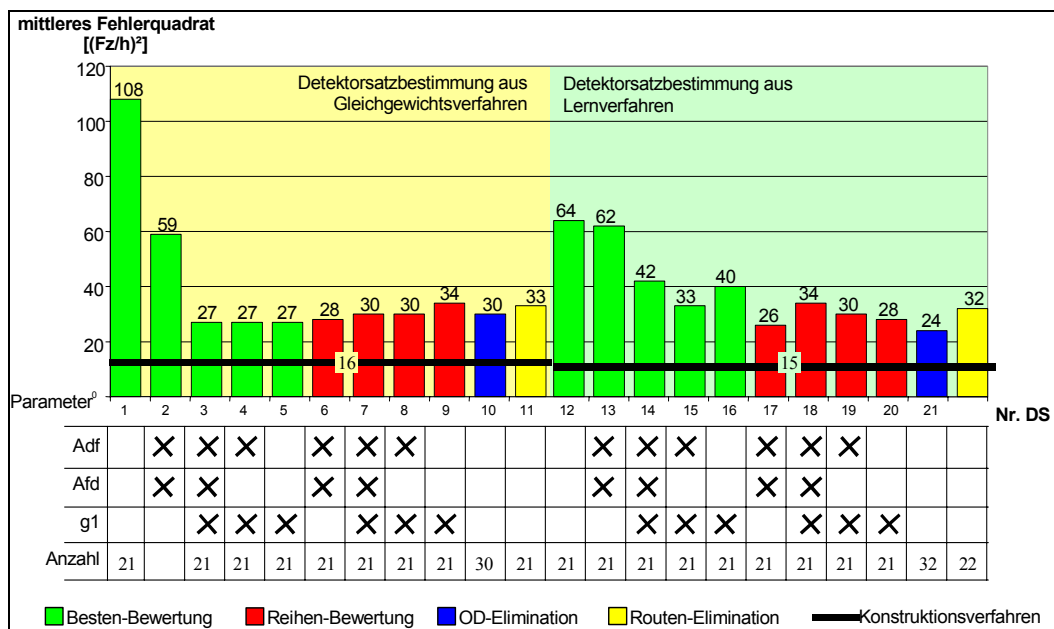


Bild 43: Vergleich der Detektorsätze mit VStromFuzzy bei Soll-Matrix M10(1)_v ($\Sigma=19.015$ Fz./h im Netz) (Abkürzungen siehe **Anlage 9**)

Die Ergebnisse der „Reihen-Bewertung“ (R2) mit den gleichen Kombinationen an indirekten Parametern erzielen beim Gleichgewichtsverfahren sowie beim Lernverfahren etwa gleiche Abweichung bei der Quelle-Ziel-Matrix-Schätzung. Für die weiteren Vergleiche werden die Detektorsätze 6 bzw. 17 ausgewählt, da die Ergebnisse hier leicht besser scheinen.

Die Detektorsätze (DS10, DS21), die mit der „OD-Elimination“ (R3) ausgewählt wurden, liegen sie, wie beschrieben, in ihrer Anzahl etwas höher, erreichen jedoch auch eine etwas niedrigere Abweichungen in der Matrixschätzung.

Auch die Auswahlregel „Routen-Elimination“ (R4), welche die geringste Anzahl an Detektoren definiert (DS11, DS22), erreicht eine entsprechende Abweichung der Schätz-Matrix von der Soll-Matrix.

Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass alle Auswahlverfahren bei geeigneter Kombination von Gewichtungparametern, eine ähnliche Abweichungen der geschätzten Quelle-Ziel-Matrix erzeugen.

Dies bedeutet, dass das Bewertungskriterium der Abweichung der Schätz-Matrix von der Soll-Matrix hier zu keiner Unterscheidung führt.

6.3 Bewertung der Robustheit gegenüber Änderungen der Randbedingungen

6.3.1 Gewichtung der Randbedingungen

Es können drei wesentliche Randbedingungen mit Einfluss auf die Ergebnisse benannt werden:

- das Routensuch- und Umlegungsverfahren,
- das Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren und
- die zu schätzenden Soll-Matrizen, welche die unterschiedlichen Nachfragesituationen im Testgebiet repräsentieren.

Im praktischen Einsatz eines Modells, das die Verkehrslage in einem Gebiet abbilden soll, wird zunächst ein Netzmodell aufgebaut und mit einem ausgewählten Routensuch- und Umlegungsverfahren geeicht. In der Regel wird das Routensuch- und Umlegungsverfahren während des

Betriebs nicht gewechselt. Es gilt also zu überprüfen, ob das gewählte Auswahlverfahren für beide Umlegungsverfahren das geeignetste ist. Eine Überprüfung, inwieweit ein Detektorsatz, der auf der Grundlage eines geeichten Netzmodells mit dem Gleichgewichtsverfahren auch in einem Modell mit dem Lernverfahren gute Ergebnisse erzielt, ist nicht notwendigerweise praxisrelevant, wird hier aber dennoch durchgeführt.

Auch das Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren wird zu Beginn des Aufbaus eines Netzmodells festgelegt. Da das Schätzverfahren mit einer Grundmatrix arbeitet, die auf ein Netz mit einem Routensuch- und Umlegungsverfahren umgelegt wurde, bilden bei der Eichung des Modells beide eingesetzten Verfahren eine Einheit, die in der Regel während des Betriebs nicht mehr gewechselt wird. Dies wird besonders relevant, wenn sich die Routenwahl stark unterscheidet, wie es beim Gleichgewichtsverfahren und beim PFE der Fall ist (**Bild 46**).

Im Gegensatz zu den zu Beginn der Modellbildung festgelegten, zum Einsatz kommenden Verfahren, die als statische Komponente des Modells betrachtet werden können, müssen die hier untersuchten Verfahren insbesondere auf alle Nachfrageschwankungen reagieren können. Die Robustheit gegenüber unterschiedlichen Soll-Matrizen ist demnach die wichtigste Bewertungsgröße.

6.3.2 Einfluss der eingesetzten Routensuch- und Umlegungsverfahren

Wie in **Bild 42** und **Bild 43** bereits dargestellt, erweisen sich alle Auswahlverfahren sowohl hinsichtlich der Anzahl und Lage der definierten Detektoren als auch hinsichtlich der erreichbaren Abweichungen der geschätzten Matrix als äußerst robust gegenüber Veränderungen bei der Routenwahl durch das Gleichgewichtsverfahren und das Lernverfahren.

In **Bild 44** ist das Differenznetz bei Umlegung der Grundmatrix nach Gleichgewichtsverfahren und nach Lernverfahren dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Unterschiede in der Umlegung im ausgewählten Testgebiet eher gering sind. Dies erklärt auch die geringe Wirkung des Wechsels der Routensuch- und Umlegungsverfahrens. Es ist möglich,

dass bei Testgebieten anderer Struktur hier eine höhere Differenz auftritt. Dies könnte dann zu größeren Wirkungen auf die Detektorsatzbestimmung führen. Jedoch ist auch hier wieder zu beachten, dass in der Regel ein Wechsel des für ein festgelegtes Routensuch- und Umlegungsverfahren geeichten Modells im Betrieb nicht stattfindet.

Der Einfluss des Path Flow Estimators wird in **Abschnitt 6.3.3** näher erläutert.

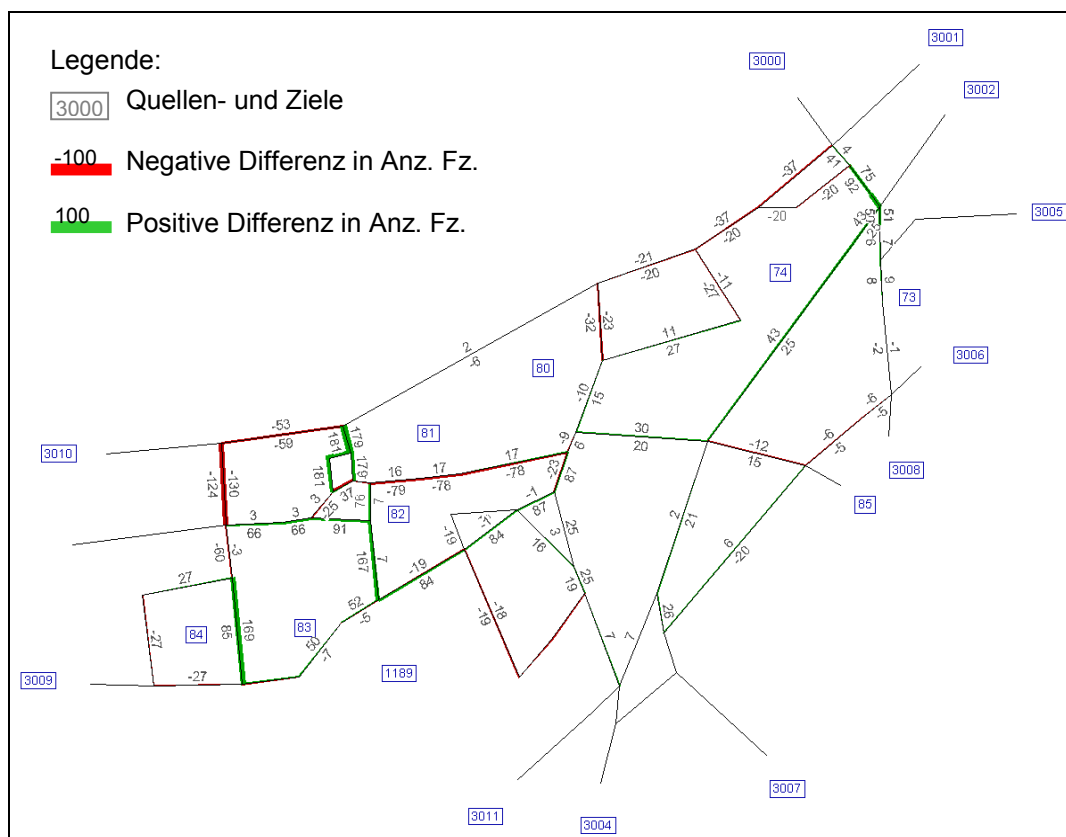


Bild 44: Differenznetz der Grundmatrix, umgelegt nach Gleichgewichtsverfahren und Lernverfahren (7:00-8:00 Uhr)

Es gilt nun trotzdem zu prüfen, inwieweit die Auswahlverfahren, die auf der umgelegten Grundmatrix aufbauen, durch die unterschiedliche Verteilung der Routen beeinflusst werden.

In **Bild 45** ist die Veränderung der Abweichungen von Soll-Matrix und Schätz-Matrix beim Einsatz eines auf der Grundlage vom Gleich-

gewichtsverfahren definierten Detektorsatzes beim Lernverfahren – und umgekehrt – dargestellt.

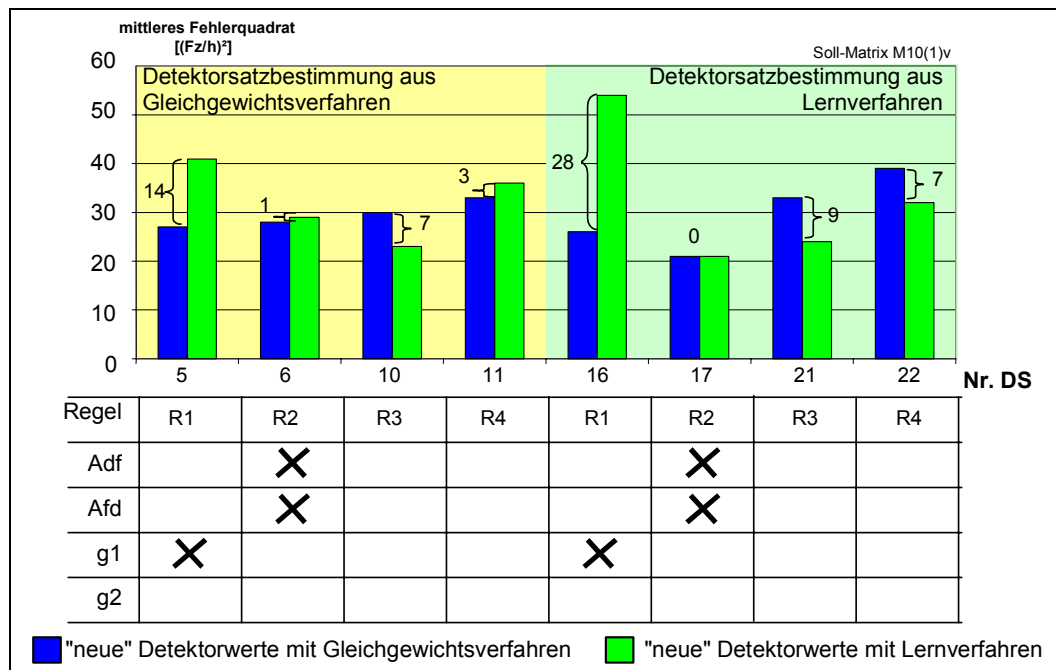


Bild 45: Vergleich der Abweichungen der geschätzten Matrizen bei Gleichgewichts- und Lernverfahren

Die "Besten-Bewertung" weist bei Gleichgewichtsverfahren und Lernverfahren die größten Differenzen auf. Bei einem Detektorsatz der auf Grundlage des Gleichgewichtsverfahrens ermittelt wurde, stellt sich eine Differenz von 14 $(Fz/h)^2$ der Schätz-Matrix von der Soll-Matrix ein, wenn die Detektorwerte aus dem Lernverfahren ermittelt werden. Im umgekehrten Fall sind beim Lernverfahren sogar 28 $(Fz/h)^2$ zu verzeichnen.

Die Differenzen sind relativ zu den Verfahren untereinander zwar groß, bedeuten aber absolut keine große Wirkung ($28 (Fz/h)^2 \sim 5,3 Fz/h$).

Deshalb kann, obwohl es Unterschiede untereinander gibt, der Einfluss der Routenwahl bei den hier verglichenen Verfahren als gering eingestuft werden.

6.3.3 Einfluss der eingesetzten Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren

Da der Path Flow Estimator zur Quelle-Ziel-Matrix-Anpassung die Routen während der Matrixanpassung nach einem eigenen Verfahren umlegt (**Abschnitt 2.5.3**), ist es notwendig, zunächst die Unterschiede der Umlegungsergebnisse zu vergleichen.

Das vorliegende Testgebiet wurde (in Anlehnung an die VDRM) mit dem Gleichgewichtsverfahren geeicht. Eine Umlegung mit dem PFE mit gleichen Netzparametern führt zu starken Unterschieden (**Bild 46**), die sich auch im Ergebnis der Quelle-Ziel-Matrix-Anpassung widerspiegeln.

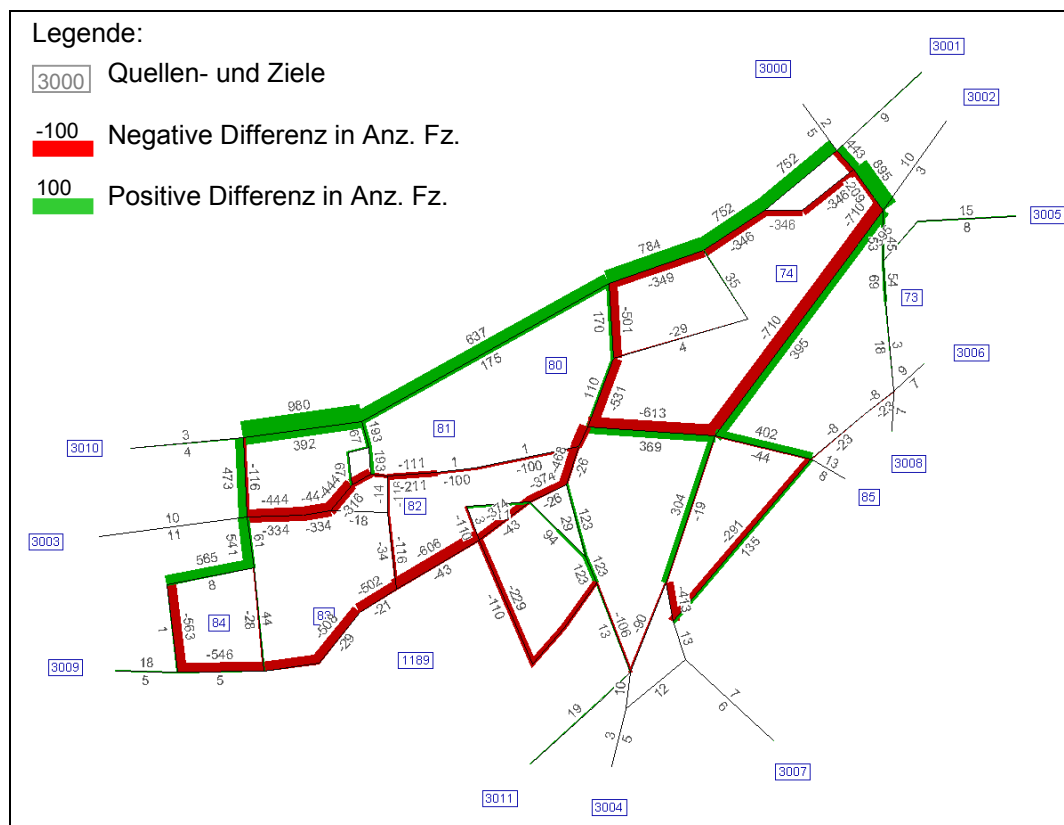


Bild 46: Differenznetz der Grundmatrix, umgelegt nach Gleichgewichtsverfahren und nach Path Flow Estimator ($\Delta = \text{PFE} - G$)

Hier wird deutlich, dass der PFE insbesondere auf den Haupttrichtungen sehr starke Differenzen aufweist. Dies kann durch die Einstellung der

Netzattribute für die Eichung der Gleichgewichtsumlegung erklärt werden, die auf den PFE nicht passt.

Diese spiegeln sich auch im Ergebnis des Vergleichs der Schätzmatrix und der Soll-Matrix wider (**Bild 47**).

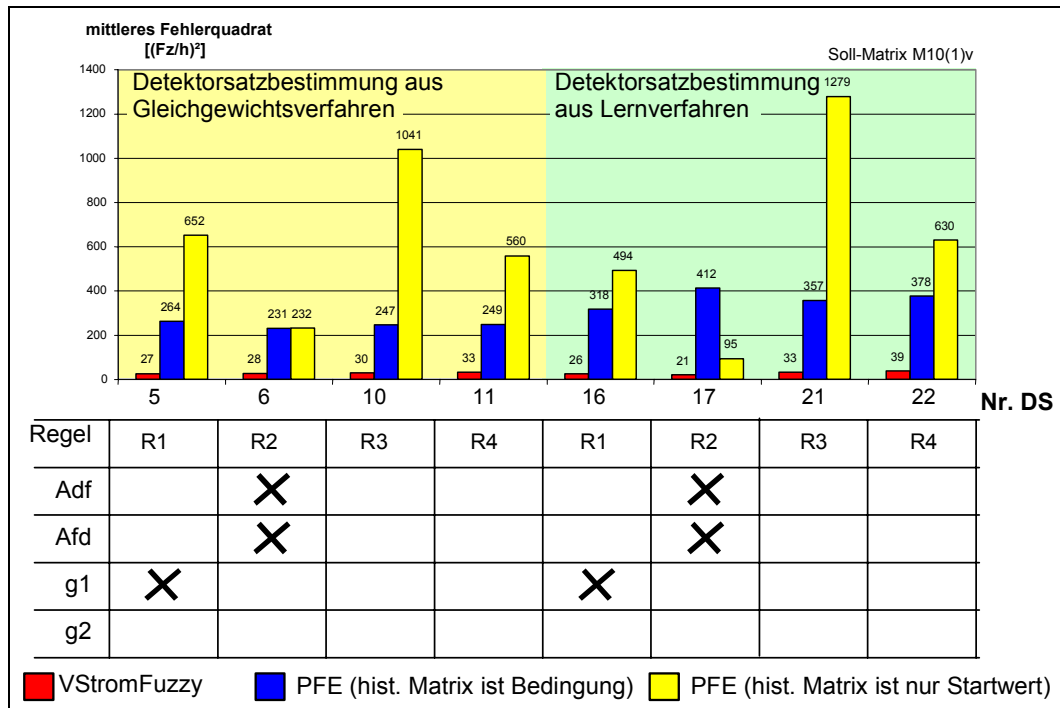


Bild 47: Abweichungen der geschätzten Matrizen mit PFE bei Soll-Matrix M10(1)v

In **Bild 47** sind die Abweichungen der durch VStromFuzzy und den PFE geschätzten Matrizen aufgetragen. Dabei werden beim PFE zwei Ansätze getestet. Die historische Matrix kann einmal als Bedingung festgelegt oder nur als Startwert verwendet werden, was die Bedeutung der neuen Zählwerte erhöht.

Beim Vergleich lassen sich große Differenzen zum Ergebnis mit VStromFuzzy feststellen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die dem Quelle-Ziel-Matrix-Verfahren zur Verfügung gestellten "neuen" Detektorwerte aus einer Gleichgewichtsumlegung der Soll-Matrix stammen. Diese stehen im Widerspruch zu der internen Umlegung, die der PFE bei der Matrixschätzung durchführt (**Bild 46**).

Werden der Matrix-Schätzung "neue" Detektorwerte aus der Umlegung der Soll-Matrix mit PFE zur Verfügung gestellt, kann das Ergebnis deutlich verbessert werden.

Am Beispiel des Konstruktionsverfahren werden in **Bild 48** die möglichen Verbesserungen dargestellt, wenn der PFE auf einer Umlegung PFE aufsetzt. Bei einer Anzahl von 21 Detektoren (Vergleichgrundlage) kann das mittlere Fehlerquadrat auf $22 (Fz/h)^2$ verringert werden.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass durch den Einsatz des PFE keine Nachteile entstehen, wenn das Netzmodell entsprechend geeicht ist und im Betrieb der Einsatz des Umlegungsverfahrens nicht gewechselt wird.

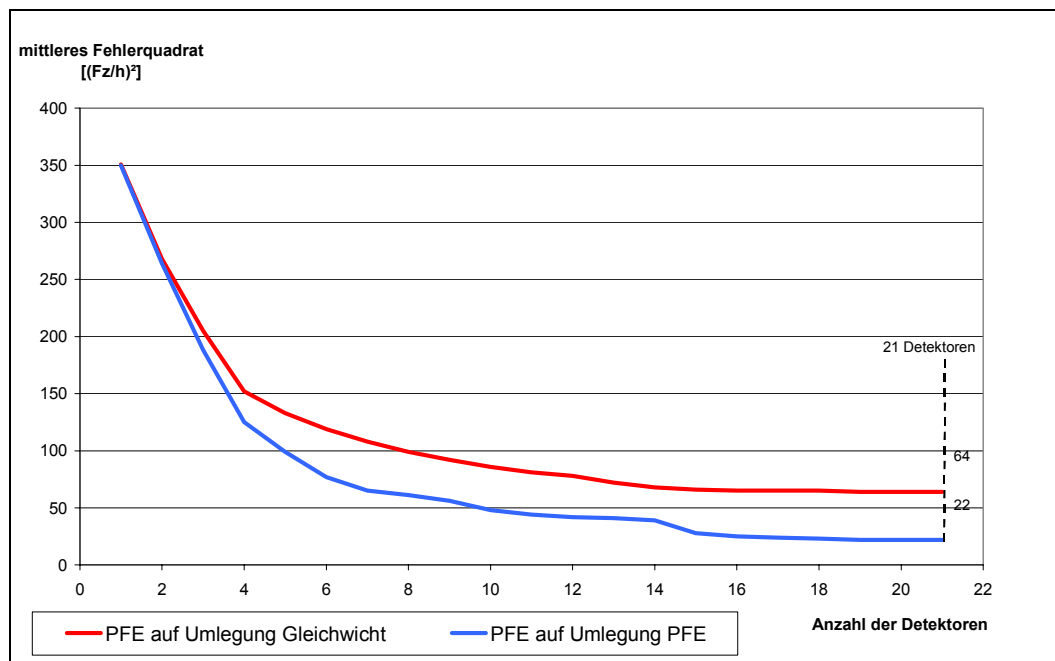


Bild 48: Verlauf der Abweichungen der geschätzten Matrizen mit PFE beim Konstruktionsverfahren bei Soll-Matrix M10(1)v

6.3.4 Einfluss der zugrunde gelegten Quelle-Ziel-Matrizen

Zur Überprüfung des Einflusses der Quelle-Ziel-Matrizen wird die Schätzung für verschiedene Soll-Matrizen durchgeführt (zur Ermittlung der Soll-Matrizen siehe **Abschnitt 5.1.5**).

In **Bild 49** sind die Abweichungen aus den Schätzungen der Auswahlregeln (repräsentiert durch jeweils einen Detektorsatz) bei unterschiedlichen Soll-Matrizen dargestellt. Die zugrunde gelegten Soll-Matrizen und ihre absolute Differenz zur Grundmatrix sind in **Anlage 2** im Detail aufgeführt.

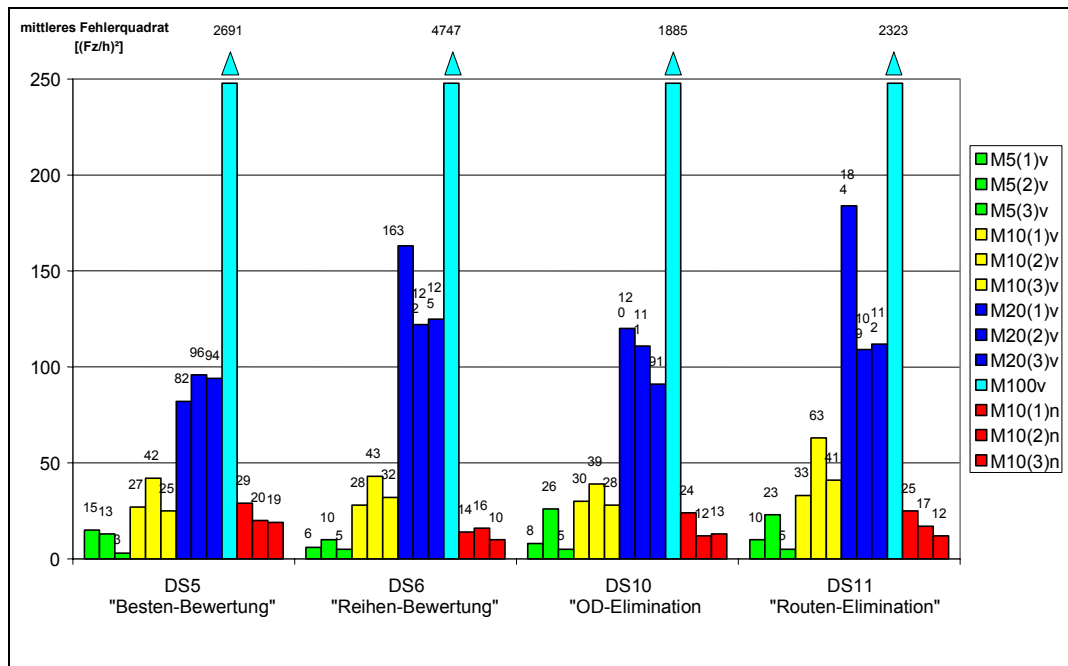


Bild 49: Einfluss der zugrunde gelegten Quelle-Ziel-Matrizen (VStromFuzzy)

Anhand des Diagramms wird deutlich, dass bei Differenzen der zu schätzenden Soll-Matrix von der Grundmatrix von deutlich mehr als 10% eine Schätzung mit anzustrebender Abweichung nicht mehr möglich ist. Dieses Problem ist bei allen untersuchten Detektorsätzen zu beobachten. Weiterhin ist im Diagramm zu erkennen, dass bei Soll-Matrizen gleicher Differenzen von der Grundmatrix die Abweichungen der geschätzten Matrizen annähernd gleich ist. Die Stichprobe von jeweils drei Soll-Matrizen pro Gruppe ist kein ausreichendes Maß für eine genaue Aussage, jedoch lässt sich hier schon der Trend einer Robustheit des Modell gegenüber Veränderungen der Nachfrage erkennen.

6.3.5 Robustheit des Konstruktionsverfahrens

Da das Konstruktionsverfahren, wie in **Abschnitt 6.2** gezeigt, eine sehr geringe Abweichung der geschätzten Matrix erzeugt, soll hier noch einmal etwas ausführlicher die Robustheit gerade dieses Verfahrens untersucht werden.

Bild 50 zeigt die Auswirkungen der unterschiedlichen Routenwahl bei der Detektorstandortwahl. Im linken Netz sind die durch das Konstruktionsverfahren ausgewählten Detektoren bei Gleichgewichtsverfahren und bei Lernverfahren dargestellt. Alle anderen Einflussgrößen sind identisch. Hier gibt es nur 6 Detektoren von 21 Detektoren, die von beiden Auswahlverfahren gewählt wurden. Im Vergleich dazu ist die Auswahlregel „Routen-Elimination“ im rechten Bild dargestellt. Im Vergleich dazu gibt es beim gleichen Versuchsaufbau 18 übereinstimmende Detektoren von 21 bei der Auswahl.

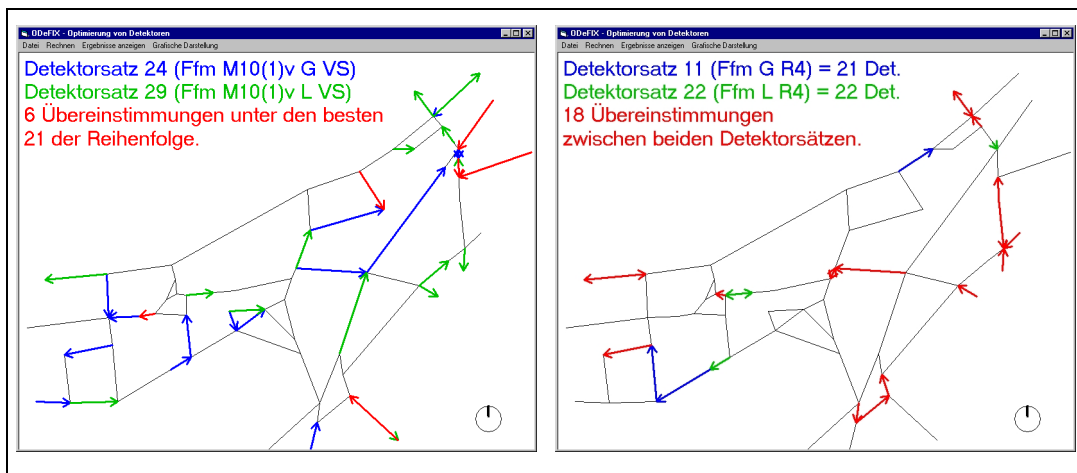


Bild 50: Vergleich der Detektorsätze beim Konstruktionsverfahren und beim Auswahlverfahren „Routen-Elimination“

Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass mit dem Konstruktionsverfahren zwar ein Detektorsatz definiert werden kann, der eine geringere Abweichung der geschätzten Matrix erzeugt als die Detektorsätze durch die Auswahlregeln. Jedoch ist dieser Detektorsatz nur schwer auf andere Situationen übertragbar. Er repräsentiert lediglich die erreichbare optimale Qualität, wenn die jeweilige Situation über den Hergebungszeitraum konstant wäre.

6.4 Theoretischer Vergleich mit Verfahren aus der Literatur

Das Verfahren von **Bianco et al. (2001)**¹⁴ basiert auf der Annahme, dass ein Sensor gleich einem voll erfassten Knotenpunkt ist. Im Sinne von stationärer Detektion, wie sie im Rahmen dieser Arbeit als Basis definiert wurde, sind zur Erfassung eines Knotens mehrere Detektoren erforderlich. Weiterhin setzen **Bianco et al. (2001)** die Eingangsgröße der Abbiegeproportionen an allen Knotenpunkten voraus, die bei den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Verfahren nicht erforderlich ist. Die Grundidee des Verfahrens basiert auf dem Einfluss, den ein erfasster Knoten (bei gegebenen Abbiegeproportionen) auf das Umfeld hat.

Eine praktische Anwendung des Verfahrens von **Bianco et al. (2001)** auf das vorliegende Netz und damit ein direkter, detaillierter Vergleich war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Jedoch konnte anhand der zitierten, im Durchschnitt ermittelten Anzahl an Detektoren von etwa 1/3 der Verkehrszellen überschlägig für das vorliegende eine Anzahl von $1/3 * 21$ Verkehrszellen = 7 zu erfassenden Knoten abgeschätzt werden. Geht man von 4-armigen Knoten aus, sind bei Kenntnis der Abbiegeproportionen (aus Routensuch- und Umlegungsberechnung) 4 Detektoren pro Knoten anzunehmen. Dies führt zu einer ungefähren Anzahl von 28 Detektoren, die das Verfahren von **Bianco et al. (2001)** ermitteln könnte. Diese Anzahl ist vergleichbar mit den hier ermittelten Detektorsätzen. Ein weitergehender Vergleich wird an dieser Stelle für zukünftige Entwicklungen empfohlen (**Kapitel 10**).

Yang / Zhou (1998) verfolgen aus der Lösung des Optimierungsproblems Min→Maximal Possible Relative Errors (MPRE) zwei Ansätze¹⁴. Der Algorithmus, der die Kenntnis der Routenwahl voraussetzt, kann mit dem "Routen-Eliminations"-Verfahren verglichen werden. Dieser auf der mathematischen Herleitung des MPRE abgeleitete Ansatz bestätigt damit die hier durch iterative Vorgehensweise und praktische Erprobung in einem realen Testgebiet abgeleitete Schlussfolgerung der "Routen-Elimination". Jedoch bieten die hier vorgestellte "Besten-Bewertung" und "OD-Elimination" gute Alternativlösungen, wenn die Routenwahl nicht bekannt ist.

¹⁴ Erläuterung der Verfahren in **Kapitel 3**

Der Unterschied zu den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren liegt in der hier entwickelten Möglichkeit, Experten-Wissen und Detektor-Bewertungen aus zusätzlichen Anforderungen (wie beispielsweise aus der Erkennung von lokalen Störungen sowie der Änderungen in der Verkehrssteuerung) durch Gewichtungparameter in die Bewertung einfließen zu lassen. So ist es möglich, auch externe Bewertungen von Standorten mit zu berücksichtigen. In weiterführenden Arbeiten können diese zusätzlichen Anforderungen auf Grundlage der hier entwickelten Verfahren miteinander überlagert werden.

6.5 Zusammenfassende Bewertung und Einsatzempfehlung

Legende ++ sehr gut + gut ○ neutral - schlecht -- sehr schlecht	Besten- Bewertung	Reihen- Bewertung	OD- Elimination	Routen- Elimination	Kon- struktions- verfahren
Anzahl	Ermittelt die Anzahl von 64 Detektoren -	Ist nicht in der Lage, eine absolute Anzahl zu ermitteln --	Ermittelt die Anzahl von 30 Detektoren +	Ermittelt die Anzahl von 21 Detektoren ++	Ist nicht in der Lage, eine absolute Anzahl zu ermitteln --
Abweichung der geschätzten Matrix	Alle indirekten Verfahren haben eine vergleichbar gute Qualität.				Erzielt eine sehr geringe Abweichungen
Robustheit bei wechselnden Routensuch- und Umlenungsverfahren (G + L)	Alle indirekten Verfahren erweisen sich als vergleichbar robust gegen über dem Wechsel des Routenwahlverfahrens von Gleichgewicht auf Lernverfahren.				Hat eine höhere Abhängigkeit
Robustheit bei wechselnden Schätzverfahren	Die Verfahren funktionieren auch bei anderen Schätzverfahren, wenn die Grundlage in dem jeweiligen Verfahren geeicht ist. Ein Wechsel des Verfahrens während des Betriebs ohne vorherige Eichung des Netzmodells liefert aber unzureichende Ergebnisse.				
Robustheit bei wechselnden Soll-Matrizen	Alle indirekten Verfahren erweisen sich als vergleichbar robust gegenüber unterschiedlichen Nachfragesituationen.				Hat eine höhere Abhängigkeit
Aufwand bei der Schaffung der Grundlagen	Erforderlich sind nur $\vec{f} \cdot P = \vec{v}$ ++	Erforderlich sind nur $\vec{f} \cdot P = \vec{v}$ ++	Erforderlich sind $\vec{f} \cdot P = \vec{v}$ plus Mindestabdeckung (Nutzer) ++	Erforderlich sind $\vec{f} \cdot P = \vec{v}$ plus Routenverteilung +	Erforderlich sind $\vec{f} \cdot P = \vec{v}$ plus Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren -

Bild 51: Zusammenfassende Bewertung der Auswahlverfahren

6.5.1 Besten-Bewertung

Die "Besten-Bewertung" ist ein einfaches Verfahren, das ohne großen Aufwand einzelne Detektoren bewertet. Die mit ihm ermittelten Rangfolgen von Detektoren erreichen vergleichbare Abweichungen mit den anderen Verfahren. Jedoch ermittelt es für große Netze keinen verwendbaren Detektorsatz, da redundante Detektoren nicht eliminiert werden.

Die erforderlichen Eingangsgrößen entsprechen denen der gängigen Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren selbst, so dass kein zusätzlicher Aufwand entsteht und keine weiteren Abhängigkeiten geschaffen werden.

Anwendungsempfehlung

Der Einsatz des Verfahren der "Besten-Bewertung" wird für kleine, wenig verzweigte Netze empfohlen. Zusätzliche Anwendung findet die "Besten-Bewertung" in Fällen, für die bei vorgegebener Anzahl an Detektoren überschlüssig Standorte bestimmt werden müssen.

6.5.2 Reihen-Bewertung

Die "Reihen-Bewertung" ist ein Verfahren, das ebenfalls nur einzelne Detektoren bewertet. Wie bei der "Besten-Bewertung" werden über die Anforderungen der Anpassungsverfahren hinaus keine weiteren Grunddaten benötigt. Im Gegensatz zum "Besten-Bewertung" ermittelt es jedoch in jedem Fall eine Rangfolge von Detektoren. Optimale Detektorsätze können mit ihm nicht ermittelt werden.

Anwendungsempfehlung

Die "Reihen-Bewertung" stellt ein alternatives Verfahren zu "Besten-Bewertung" dar. Die Erprobung im Testgebiet hat gezeigt, dass keine wesentlichen Verbesserungen gegenüber der "Besten-Bewertung" erreicht werden, aber auch keine Nachteile entstehen. Bei kleinen Netzen wird allerdings der "Besten-Bewertung" der Vorzug gegeben.

6.5.3 OD-Elimination

Das Verfahren der "OD-Elimination" bewertet ganze Detektorsätze, berücksichtigt also die Wechselwirkung der Kombination einzelner Detektorstandorte. Als Eingangsparameter verwendet es die für die Quelle-Ziel-Matrix-Anpassung erforderlichen Parameter plus einer vom Nutzer festzusetzenden Mindestabdeckung, die beschreibt, wann eine Quelle-Ziel-Beziehung als eliminiert betrachtet werden kann.

Die "OD-Elimination" bestimmt einen endlichen Detektorsatz, schließt allerdings (auch in Abhängigkeit der vom Nutzer gewählten Mindestabdeckung) redundante Standorte nicht immer aus. Die mit dem aus der "OD-Elimination" ermittelten Detektorsatz erreichten Abweichungen der geschätzten Matrix sind mit den anderen Verfahren vergleichbar.

Anwendungsempfehlung

Das Verfahren der "OD-Elimination" wird für den Einsatz bei großen, verzweigten Netzen empfohlen, für die keine verlässlichen Angaben über die einzelnen gewählten Routen vorliegen. In diesen Fällen liefert das Verfahren eine erste Auswahl an Detektorstandorten.

6.5.4 Routen-Elimination

Das Verfahren der "Routen-Elimination" ermittelt einen Detektorsatz indem alle gewählten Routen im Gebiet eliminiert werden. Es setzt neben den Eingangsgrößen der Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren auch noch die Kenntnis über die gewählten Routen voraus.

Die "Routen-Elimination" ermittelt im Vergleich zu den anderen untersuchten Verfahren die geringste Anzahl an Detektoren, die eine vergleichbare Abweichung der Schätzmatrix erzeugen. Da, in Anlehnung an die gewählten Routen, alle Verkehrsströme erfasst werden vermeidet es die Wahl redundanter Detektoren. Liegt die Kenntnis über die Routenwahl vor, ist es dem Verfahren der "OD-Elimination" vorzuziehen.

Anwendungsempfehlung

Das Verfahren der "Routen-Elimination" wird für den Einsatz bei großen, verzweigten Netzen empfohlen, für die verlässlichen Angaben über die einzelnen gewählten Routen vorliegen. In diesen Fällen liefert es die minimale Anzahl an Detektoren, die erforderlich sind, um die Quelle-Ziel-Matrix abzubilden. Wenn die Verlässlichkeit der Routenwahl gegeben ist, ist die "Routen-Elimination" das von den untersuchten Verfahren geeignetste (vgl. auch **Yang / Zhou (1998)**).

6.5.5 Konstruktionsverfahren

Das Konstruktionsverfahren ist für den Praxiseinsatz sehr aufwendig. Mit dem eingesetzten PC (siehe **Abs. 5.3.1**) werden ungefähr 14 Stunden Rechenzeit benötigt, um den Konvergenzbereich des Abweichungsverlaufs zu erreichen. Das Verfahren erfordert außerdem den Einsatz eines Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsprogramms und den Aufbau einer synthetischen Simulationsumgebung, in der die notwendige virtuelle Soll-Matrix und die zugehörigen Detektorwerte durch Routenumlegung erzeugt werden können.

Im Anfangsbereich – bei geringer Anzahl von Detektoren im Satz – ist die ermittelte Abweichung kritisch zu beurteilen, da die Unterschiede bei der Auswahl des jeweils besten Detektors einer Stufe teilweise sehr gering sind. In **Bild 52** sind beispielhaft die mittlere Abweichung im Quadrat und die mittlere Abweichung im Betrag der Detektoren nach der ersten Stufe der Auswahl dargestellt. Etwa 120 Detektoren erzeugen in der ersten Stufe die gleiche mittlere Abweichung im Betrag der Quelle-Ziel-Matrix. Die mittlere Abweichung im Quadrat differenziert etwas mehr, wobei die Werte immer noch zu dicht beieinander liegen, um gesicherte Auswahlentscheidungen treffen zu können. Die Wahl der erstbesten Detektoren ist deshalb – mehr noch als die der weiteren – abhängig von den Randbedingungen des Untersuchungsfalls. Dies ist eine wesentliche Schwachstelle dieses heuristischen Konstruktionsverfahrens. Es ist durchaus wahrscheinlich, dass durch einen ungünstigen Beginn der Auswahl, die tatsächliche optimale Rangfolge nicht gefunden wird.

Da, wie bereits erläutert, sogar die Bestimmung der ersten fünf Detektoren aufgrund des Rechenaufwands nicht machbar ist, wird mit dieser Unsicherheit zunächst weitergearbeitet. Alle Ergebnisse sind jedoch unter diesem Gesichtspunkt zu beurteilen.

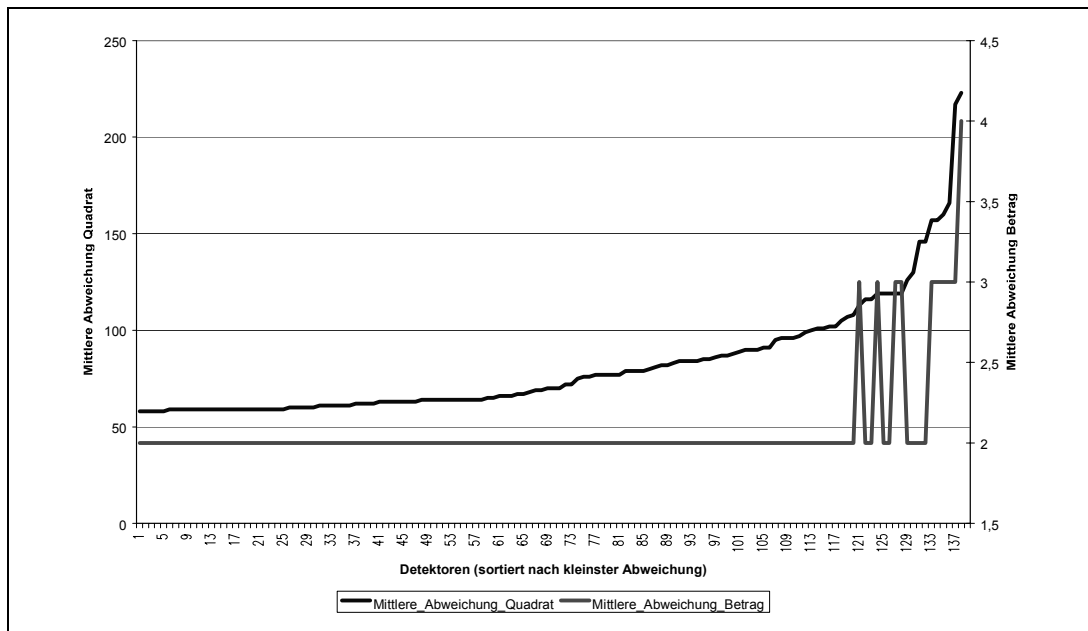


Bild 52: Ermittelte Abweichung der Detektoren in der ersten Stufe

Hinzu kommt, dass das Verfahren die virtuelle Soll-Matrix mit zur Bewertung heranzieht. Der als Ergebnis ausgewählte Detektorssatz ist in starkem Maße abhängig von der in der synthetischen Untersuchungsumgebung gewählten Soll-Matrix.

Die Ergebnisse in **Abschnitt 6.2** zeigen, dass schon bei geringer Veränderung der Soll-Matrix sehr unterschiedliche Detektorsätze gewählt werden. Für den praktischen Einsatz, bei dem neben der Qualität der geschätzten Quelle-Ziel-Matrix auch die Robustheit des Verfahrens eine Rolle spielt, ist dieses Verfahren deshalb nicht geeignet.

Auf der anderen Seite wird durch diese Abhängigkeit für den Untersuchungsfall auch trotz der erwähnten Schwachstellen eine sehr geringe Abweichung der geschätzten Matrix erreicht.

Anwendungsempfehlung

Das Konstruktionsverfahren ist für die Bestimmung von Detektoren für die Erfassung der unterschiedlichen Belastungszustände im Alltagsgeschäft nicht zu empfehlen, da es sehr sensible auf Veränderungen der Randbedingungen reagiert und hohen Aufwand erfordert.

Dennoch gibt das Ergebnis des Konstruktionsverfahrens einen Hinweis darauf, welche minimale Abweichung der geschätzten Matrix für eine bestimmte Kombination von Randbedingungen zu erreichen wäre. Deshalb wird der Einsatz des Konstruktionsverfahrens als Benchmarking empfohlen.

7. Validierung des ermittelten optimalen Detektorsatzes für das Testgebiet

7.1 Einsatz weiterer theoretischer Matrizen

Durch die „Routen-Elimination“ konnten im Testgebiet 21 Detektoren definiert werden (**Bild 53**). Da dieser Detektorsatz im Vergleich die geringste Anzahl an Detektoren darstellt, wird die Validierung an diesem Ergebnis durchgeführt.

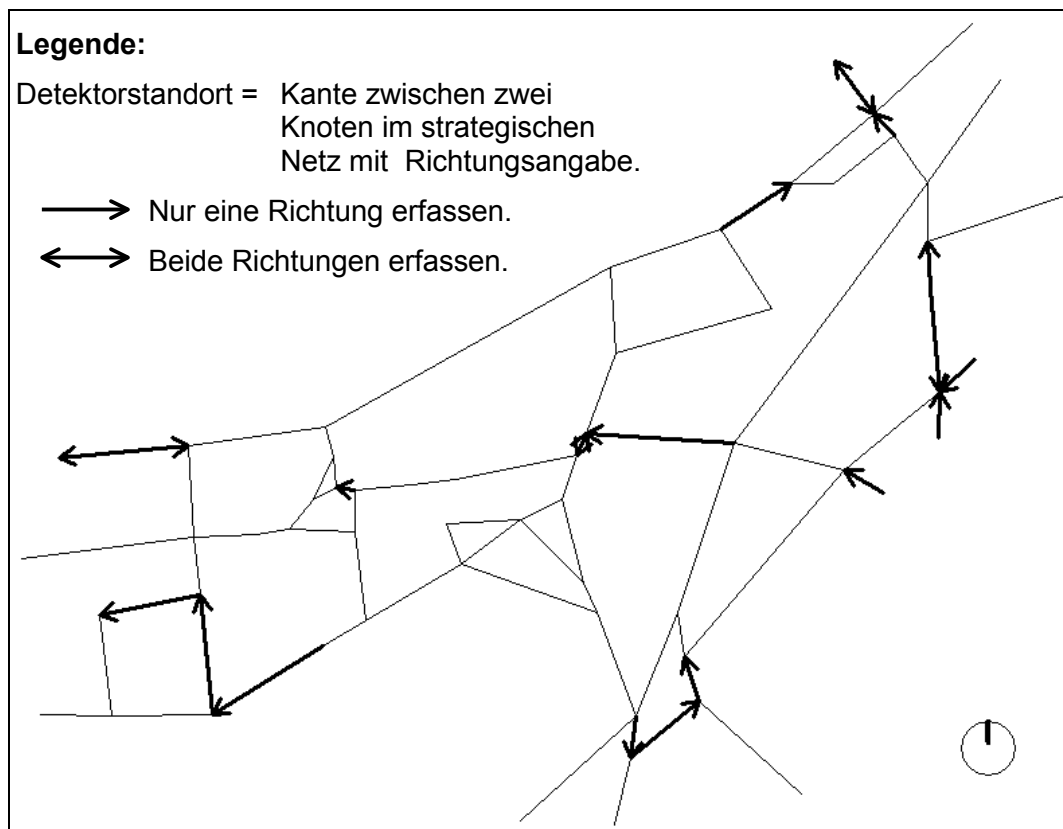


Bild 53: Optimaler Detektorsatz für das Testgebiet (21 Detektoren)

Neben der Validierung der durch den Detektorsatz geschätzten Matrizen, wie sie bei der vergleichenden Bewertung der Verfahren bereits teilweise durchgeführt wurde, werden die geschätzten Matrizen nun unter Einsatz eines Routensuch- und Umlegungsverfahrens auf das strategische Netz umgelegt. Die nächste Evaluationsstufe ist der Vergleich der Kantenbelastungen. Dazu wird die geschätzte Matrix erneut auf das

umgelegt und die Verkehrsstärke auf den Kanten wird mit den Soll-Verkehrsstärke verglichen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte dieser Validierungsschritt nur auf der Grundlage der synthetischen Untersuchungsumgebung durchgeführt werden. Weitere Validierungsschritte werden in **Kapitel 10** diskutiert.

In **Anlage 8** sind die Einzelergebnisse für alle untersuchten Matrizen graphisch dargestellt. Beispielhaft ist in **Bild 54** das Ergebnis der Gleichgewichtsumlegung bei 10% Schwankungsbreite der Soll-Matrix von der Grund-Matrix dargestellt.

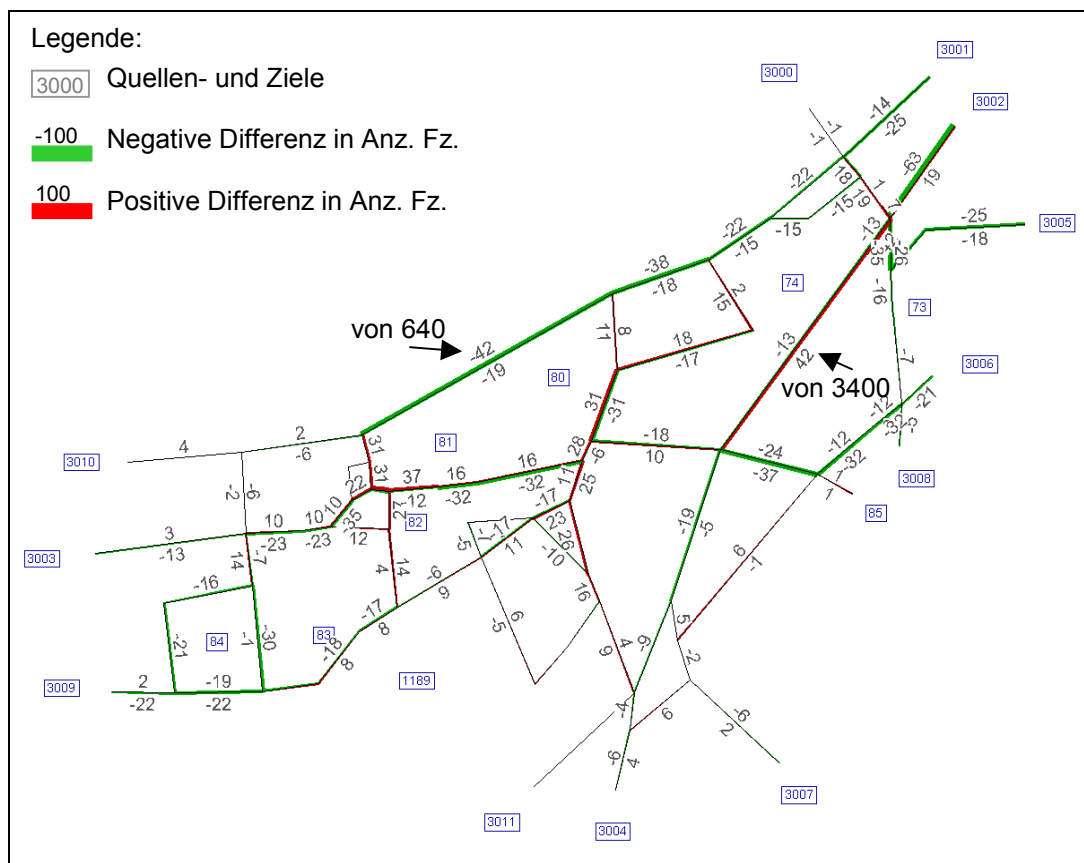


Bild 54: Differenznetz: M10(1)v (Soll) – M10(1)v (Schätz) bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h]

Die mit der "Routen-Elimination" ermittelten 21 Detektoren liefern auch nach Umlegung sehr gute Ergebnisse beim Vergleich der Kantenbelastungen mit den aus der Soll-Matrix ermittelten Vergleichswerten. Ein

Vergleich mit realen Verkehrsstärken, der im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war, ist anzustrengen (**Kapitel 10**).

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Standardabweichung als Maß der Schwankung der für die einzelnen Matrizen ermittelten mittleren Fehlerquadrate.

Matrix-Typ		mittl. Abweichung [(Fz/h) ²]	Standardabweichung	Stichprobe
vormittags 5%	Matrix-bewertung	13	9,29	3
vormittags 10%		46	15,53	3
vormittags 20%		135	42,46	3
nachmittags 10%		18	6,56	3
vormittags 5%	Kanten-bewertung	529	119,68	3
vormittags 10%		552	210,10	3
vormittags 20%		1364	177,53	3
nachmittags 10%		302	93,33	3

Es wird deutlich, dass der ermittelte Detektorsatz, innerhalb einer Gruppe von Soll-Matrizen mit gleicher Abweichung von der Grundmatrix (z.B. M10 = 10% Abweichung von der Grundmatrix), vergleichbare Ergebnisse bei der Anpassung liefert. Je höher die Abweichung der Soll-Matrix von der Grundmatrix ist, umso mehr erreichen die Quelle-Ziel-Matrixanpassungsverfahren die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit.

Die mittleren Fehlerquadrate der Kantenbelastungen liegen im Betrag höher als die der Quelle-Ziel-Matrix. Dies ist dadurch zu erklären, dass Fehler in Quelle-Ziel-Beziehungen, deren Routen über die gleichen Kantenabschnitte führen, sich addieren. Zusätzlich ist eine größere Abweichung in der Routenwahl durch fehlerhafte Quelle-Ziel-Belastungen denkbar.

Trotz der höheren mittleren Abweichungen zeigen die Einzelabweichungen, die in **Anlage 8** im Netzmodell dargestellt sind, zufriedenstellende Ergebnisse.

Selbst der Einsatz des auf Grundlage der Vormittags-Matrix ermittelten Detektorsatzes für die Schätzung der Nachmittagsspitze erzielt gute Ergebnisse (siehe M10(1)n, M10(2)n und M10(3)n in **Anlage 8**).

Zusammenfassend bestätigt die erste, auf planerischen Werten beruhende Evaluation die Robustheit des ermittelten Detektorsatzes. Wenn die zu schätzende Soll-Matrix nicht zu stark von der Grundmatrix abweicht (Abweichungen im Betrag $< 20\%$), sind mit dem ermittelten Detektorsatz gute Ergebnisse bei der Schätzung einer Abbildung der aktuellen Nachfrage zu erreichen.

7.2 Vergleich mit von ortskundigen Experten definierten Detektorsätzen

Um die Eignung des Verfahrens für seinen Einsatzzweck besser bewerten zu können, wurden zusätzlich drei Experten der Stadt Frankfurt a.M. gebeten, für dasselbe Testgebiet aus ihrer Sicht entsprechende Detektoren festzulegen¹⁵. Das Ergebnis Untersuchung sowie die Grundmatrix waren keinem der Experten vorher bekannt.

Alle Detektorsätze wurden anhand der Anzahl und Lage der einzelnen Detektoren sowie anhand der Abweichungsparameter mit dem Detektorsatz verglichen, der durch die "Routen-Elimination" ermittelt wurde, da dieser in Anzahl und Abweichung als der Detektorsatz mit geringsten Anzahl an Detektoren identifiziert werden konnte. Die dabei durch die drei Experten festgelegten Detektorsätze sind in **Bild 55** bis **Bild 57** im Vergleich zum Detektorsatz der "Routen-Elimination" dargestellt.

¹⁵ Die Befragung und Auswertung wurde mit der Unterstützung von Herrn Dipl.-Ing. Andreas Figur am ZIV – Zentrum für integrierte Verkehrssysteme durchgeführt.

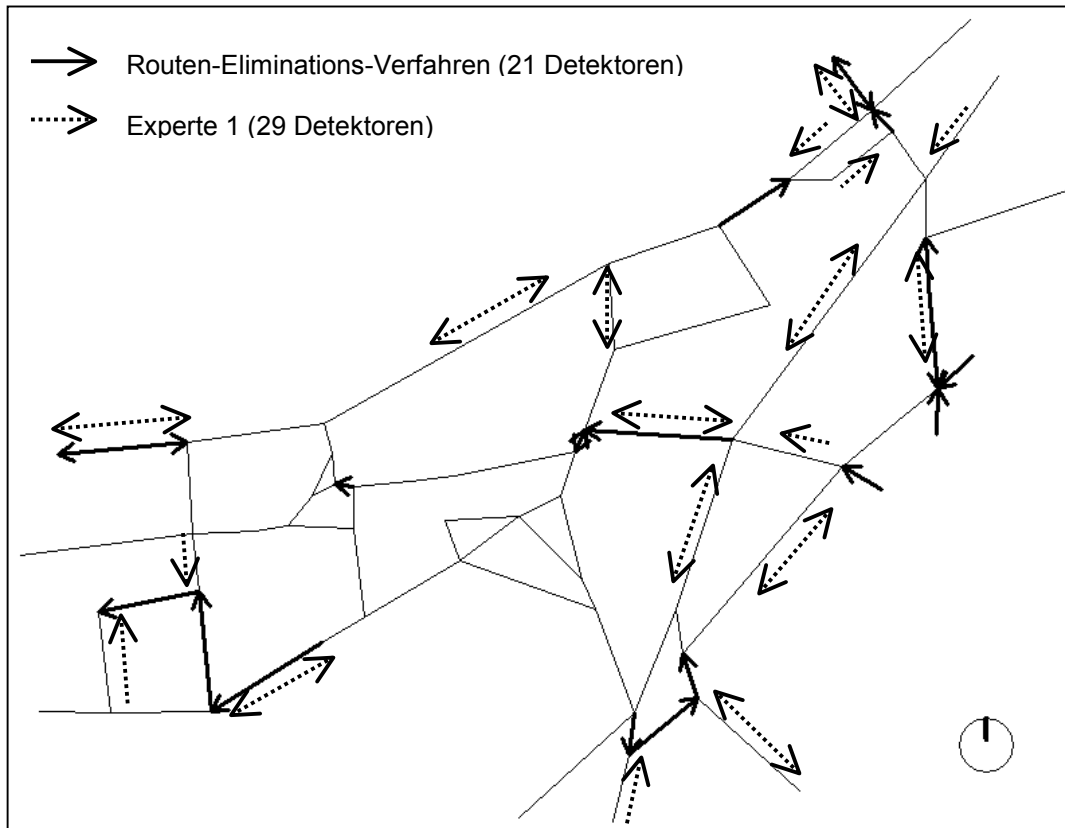


Bild 55: Durch Experte 1 ausgewählter Detektorsatz für das Testgebiet

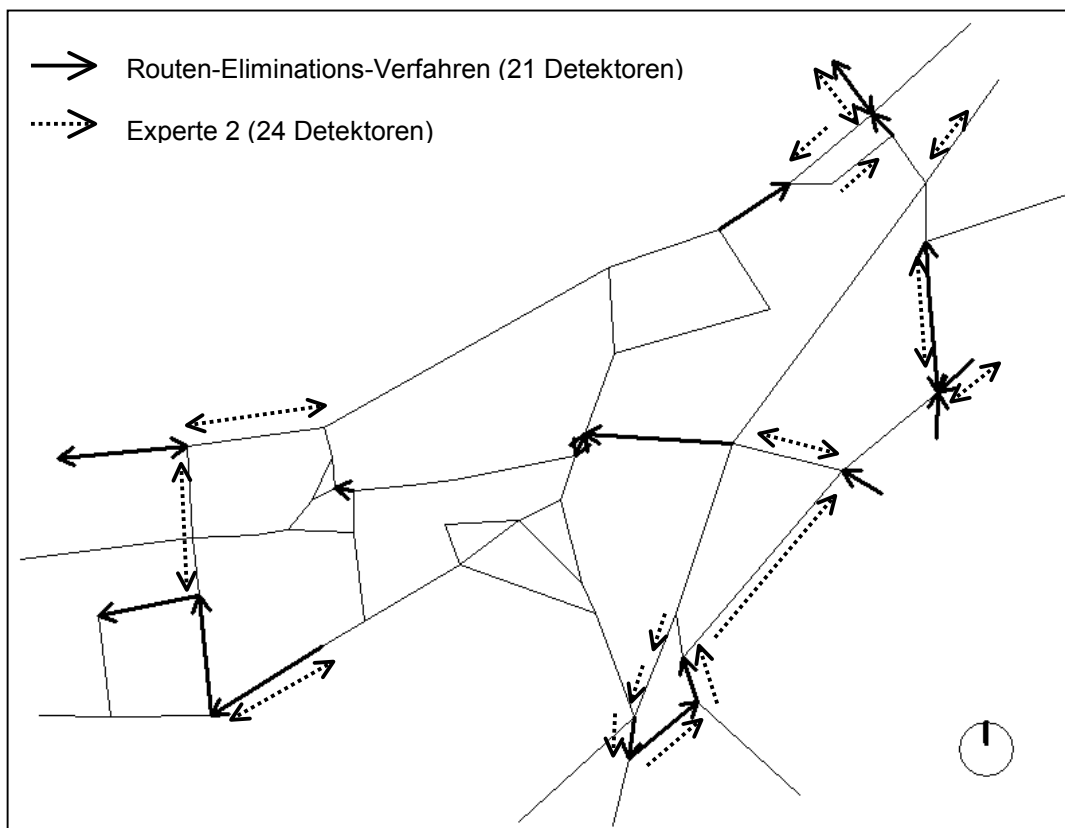


Bild 56: Durch Experte 2 ausgewählter Detektorsatz für das Testgebiet

Als vergleichende Bewertungsgröße wird das mittlere Fehlerquadrat der Schätzmatrix herangezogen. Dieses repräsentiert die Abweichung zwischen der mit dem jeweiligen Detektorsatz geschätzten Matrix und der tatsächlichen Matrix. Je geringer die Werte sind, desto höher ist die Eignung des Detektorsatzes zur Ermittlung der Verkehrsnachfrage einzustufen. Zur Bewertung wurden 6 virtuelle Quelle-Ziel-Matrizen herangezogen, jeweils drei für die vormittägliche und die nachmittägliche Spitzenstunde, bei denen die Abweichung der einzelnen Matrixfelder von denen der Grundmatrix max. $\pm 10\%$ beträgt (vgl. **Abschnitt 5.1.5**).

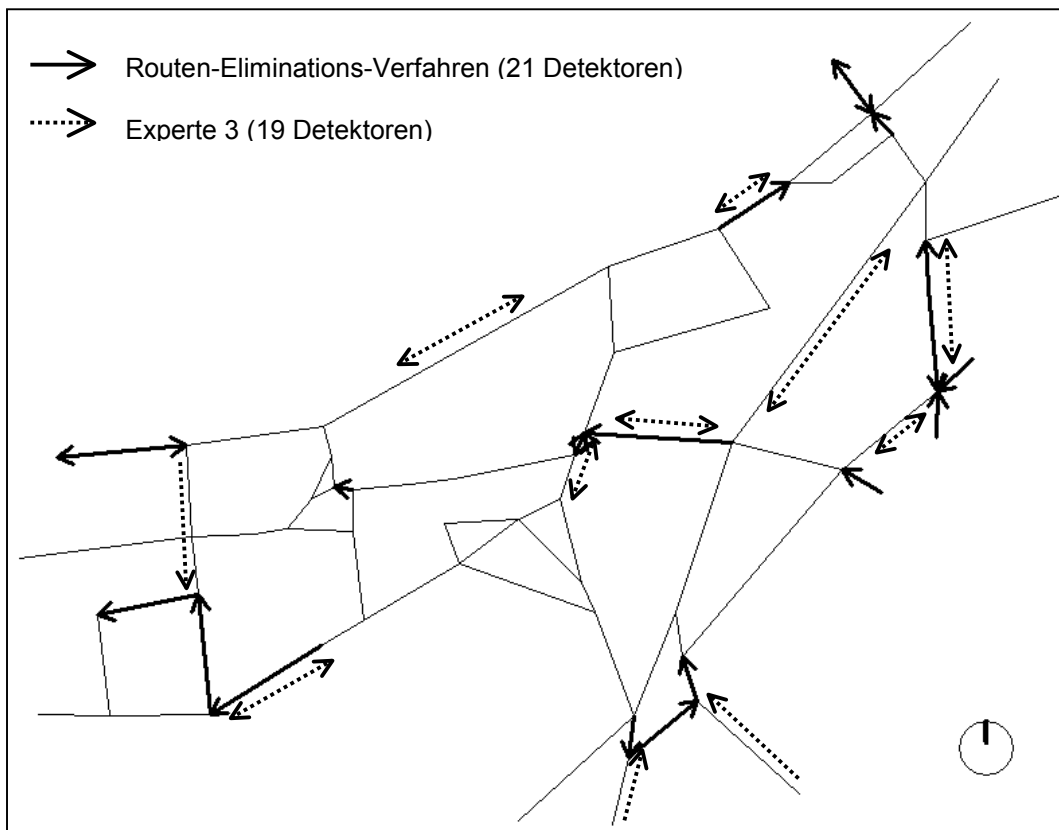


Bild 57: Durch Experte 3 ausgewählter Detektorsatz für das Testgebiet

Die mittleren Fehlerquadrate der einzelnen Detektorsätze sind in **Bild 58** wiedergegeben. Ferner wurden zum Vergleich die Differenzen der mittleren Fehlerquadrate der einzelnen von Experten gewählten Detektorsätze zu den Fehlerquadraten des Detektorsatzes des "Routen-Eliminations"-Verfahren gebildet.

	Routen- Eliminations- Verfahren	Experte 1		Experte 2		Experte 3	
	(21 Detektoren)	(29 Detektoren)		(24 Detektoren)		(19 Detektoren)	
	mittleres Fehler- quadrat	mittleres Fehler- quadrat	Diff. zum Routen- Eliminations- Verfahren	mittleres Fehler- quadrat	Diff. zum Routen- Eliminations- Verfahren	mittleres Fehler- quadrat	Diff. zum Routen- Eliminations- Verfahren
	$[(Fz/h)^2]$	$[(Fz/h)^2]$	$[(Fz/h)^2]$	$[(Fz/h)^2]$	$[(Fz/h)^2]$	$[(Fz/h)^2]$	$[(Fz/h)^2]$
vormittags 1	33	34	1	31	-2	34	1
vormittags 2	63	44	-19	47	-16	34	-29
vormittags 3	41	24	-17	21	-20	38	-3
nachmittags 1	25	18	-7	17	-8	29	4
nachmittags 2	17	24	7	18	1	20	3
nachmittags 3	12	14	2	16	4	20	8

Bild 58: Vergleichende Bewertung der Detektorsätze aus der Expertenbewertung

Die Detektorsätze der Experten liefern in der Summe über alle virtuellen Quelle-Ziel-Matrizen vergleichbare Ergebnisse wie das "Routen-Eliminations"-Verfahren. Die höchste Differenz von $-29 (Fz/h)^2$ (vormittags bei Experte 3) repräsentiert im Mittel eine Abweichung von nur etwas mehr als 5 Fahrzeugen in der Stunde.

Die Anzahl der gewählten Detektoren unterscheidet sich bei Experte 2 (23 Detektoren) und Experte 3 (19 Detektoren) nur geringfügig von der vom "Routen-Eliminations"-Verfahren ermittelten Anzahl von 21 Detektoren. Experte 1 liegt mit 29 ausgewählten Detektoren am höchsten.

In der Summe sind $2/3$ der vom "Routen-Eliminations"-Verfahren gewählten Detektoren auch von mindestens einem Experten gewählt worden.

Man kann also feststellen, dass das "Routen-Eliminations"-Verfahren Experten bei der Definition von Detektorstandorten unterstützen kann.

8. Übertragbarkeit der Ergebnisse

8.1 Beurteilung der Datengrundlage und der Annahmen

Durchführung des Verfahrens

Für die Durchführung der entwickelten Verfahren sind im wesentlichen folgende Eingangsdaten erforderlich:

- Eine planerische (realitätsnahe) Quelle-Ziel-Matrix des Untersuchungsgebiets für den Untersuchungszeitraum,
- die Anteilsmatrix P , und
- (bei der "Routen-Elimination") die Kenntnis über die Routenwahl.

Die erforderliche **Quelle-Ziel-Matrix** wurde in der vorliegenden Untersuchung aus der VDRM abgeleitet. Die VDRM beinhaltet eine planerische Quelle-Ziel-Matrix für das gesamte Rhein-Main-Gebiet mit 24 Stundenwerten. Das Untersuchungsgebiet repräsentiert nur einen Teil dieses VDRM-Netzes. Die Generierung der Matrix für das Teilnetz sowie die Ableitung von Stundenmatrizen für die Spitzenstunden aus der 24-Stunden-Matrix können zu zusätzlichen Ungenauigkeiten im Vergleich zur Realität führen.

Jedoch hat sich der mit dem entwickelten Verfahren ermittelte optimale Detektorsatz als unempfindlich gegenüber Veränderungen der Quelle-Ziel-Belastungen erwiesen. Der hier auf der Grundlage der Vormittags-Matrix ermittelte Detektorsatz ist in der Lage, sowohl die Vormittagsspitze als auch die Nachmittagsspitze zu schätzen. Um endgültige Aussagen über den Einfluss unterschiedlicher Nachfragesituationen treffen zu können wird eine Validierung im realen Anwendungsfall empfohlen.

Das für die Anwendung des Verfahrens erforderliche **Routensuchergebnis** wurde im Rahmen dieser Untersuchung durch Einsatz des in VISUM (PTV AG) implementierten Gleichgewichtsverfahrens bzw. Lernverfahrens ermittelt. Zur Durchführung der Routensuche wurde das Untersuchungsgebiet in Anlehnung an die VDRM im Programm VISUM kodiert.

Im Rahmen der theoretischen Untersuchung wurden die Zellanbindungen zum größten Teil aus der VDRM übernommen, da hierfür ein geeichter Zustand des Netzes vorlag. Für die vergleichende Bewertung der entwickelten Auswahlverfahren in ähnlichen Verkehrslagen war diese Grundlage ausreichend. Für die praktische Verwendung des dabei ermittelten Detektorsatzes für das Untersuchungsgebiet, ist das zugrunde gelegte Modell noch an realen Werten zu eichen. Die Anbindung der Verkehrszellen ist mit Hilfe ortkundiger Experten zu verfeinern.

Bewertung der Auswahlverfahren

Die vergleichende Bewertung der Auswahlverfahren basiert auf der Bewertung der Abweichung der erzielten Schätzergebnisse von sogenannten Soll-Werten. Da für die theoretische Untersuchung keine tatsächlich existierenden Quelle-Ziel-Matrizen zum Vergleich vorlagen, wurde eine synthetische Untersuchungsumgebung geschaffen. Diese soll die im späteren praktischen Einsatz vorhandenen realen Verkehrsverhältnisse repräsentieren. Die synthetischen Soll-Matrizen wurden mit Hilfe eines Zufallsgenerators aus der Grund-Matrix ermittelt.

Da die Soll-Matrizen auf der Grund-Matrix basieren, pflanzen sich mögliche Ungenauigkeiten gegenüber absoluten realen Werten fort. Gleichzeitig können sich diese Abhängigkeiten auf die Bewertung der Auswahlverfahren auswirken und somit das absolute Bewertungsergebnis positiv beeinflussen. Der Vergleich der Verfahren innerhalb der gleichen synthetischen Umgebung bleibt davon jedoch unbeeinflusst.

8.2 Beurteilung des praktischen Einsatzes

Das empfohlene Verfahren der „Routen-Elimination“ ist übertragbar auf andere Untersuchungsgebiete, wenn die erforderliche Datengrundlage (planerische Quelle-Ziel-Matrix, Routenwahlergebnis) vorhanden ist.

Das im Rahmen der Untersuchung entwickelte Tool ODeFIX hat derzeit eine Schnittstelle zu VISUM (PTV AG), so dass das Verfahren ohne größeren Aufwand für in VISUM kodierte Netze anzuwenden ist.

Das Verfahren ist einem späteren möglichen Online-Betrieb vorgeschaltet. Jedoch wird die Wirkung des ermittelten Detektorsatzes anhand der mit ihm erreichten Realitätsnähe der Abbildung beurteilt.

Deshalb kommt für den praktischen Einsatz – unabhängig von der hier diskutierten Fragestellung – der Eichung des Netzmodells und der Routenwahl eine besondere Bedeutung zu. In einem schlecht geeichten und gepflegten Modell, kann der ermittelte Detektorsatz keine zufriedenstellenden Schätzergebnisse erreichen.

Die Wahl des besten Detektorsatzes mit dem Verfahren der "Routen-Elimination" ist abhängig von einer realitätsnahen Routenwahl. Hierzu sind insbesondere die Anbindungen der Quellen und Ziele in höchstmöglicher Nähe der tatsächlichen Verkehrsquellen und Verkehrsziele zu definieren, da die Belastung an den Einspeisepunkten wichtige Informationen zur Matrix liefert.

Hinsichtlich der Abweichungen des Schätzergebnisses ist die Leistungsfähigkeit des eingesetzten Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahrens ebenfalls von großer Bedeutung. Hierfür ist es erforderlich, die Grund-Matrix so zu wählen, dass die Differenz zur Soll-Matrix minimal wird. Mit zunehmender Dauer des Betriebs eines Simulationsmodells können die verwendeten und erzeugten Quelle-Ziel-Matrizen mit Referenz zu Ereignissen aufgezeichnet werden. Die Auswahl einer geeigneten Grund-Matrix aus der Bibliothek der referenzierten Matrizen für unterschiedliche Situationen wird dadurch immer genauer.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das hier empfohlene Verfahren der "Routen-Elimination" zwar auf andere Untersuchungsgebiete angewendet werden kann, im praktischen Einsatz ist die Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Modelle und die Qualität der Kalibrierung des Netzmodells jedoch von entscheidender Bedeutung. Deshalb werden zusätzlich auch die Verfahren der "Besten-Bewertung" für kleine Netze empfohlen, da dort die Voraussetzungen an die Eingangsdaten geringer sind.

9. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen der Untersuchung wurden verschiedene Auswahlverfahren zur Bestimmung eines optimalen Detektorsatzes für die permanente Nachfrageermittlung entwickelt und vergleichend bewertet.

Untersuchungsaufbau

Es wurden zunächst Indikatoren als indirekte Bewertungsparameter aus der Umlegung einer historischen bekannten Quelle-Ziel-Matrix im Untersuchungsgebiet abgeleitet. Die Auswahlverfahren bestehen aus Algorithmen, die auf der Grundlage dieser Bewertungsparameter einen optimalen Detektorsatz aus der Menge der möglichen Detektorstandorte ableiten.

Das Ziel der Auswahlverfahren ist es, mit möglichst wenig Detektoren eine Grundlage für die Schätzung einer Quelle-Ziel-Matrix zu schaffen.

Die Auswahlverfahren lassen sich in zwei große Gruppen unterteilen:

- in Verfahren, welche die Qualität eines einzelnen Detektors bewerten, und
- in Verfahren, welche die Qualität einer Kombination von Detektoren, einem Detektorsatz, bewerten.

Bei den Verfahren, die einzelne Detektoren bewerten, werden die Detektoren anhand ihrer Bewertung in eine optimale Rangfolge gebracht. Diese Vorgehensweise hat zwei wesentliche Nachteile. Zum Einen besteht bei komplexen Netzen die Schwierigkeit, dass Detektoren ausgewählt werden, die durch den schon ausgewählten Satz bereits abgedeckt sind, zum Anderen muss die Anzahl der Detektoren aus anderen Randbedingungen ermittelt werden (z.B. finanzielle Restriktionen). Der Vorteil dieser Verfahren ist die geringere Anforderung an die Eingangsdaten.

Ergebnisse der vergleichenden Bewertung der Verfahren

Nach der vergleichenden Bewertung der untersuchten Verfahren konnte die „Routen-Elimination“ aus der Gruppe der Verfahren, die eine Kombination von Detektoren bewerten, als das geeignetste Verfahren identifiziert werden. Bei der „Routen-Elimination“ werden die Routen, die

durch einen ausgewählten Detektor abgedeckt werden eliminiert. Anschließend wird die Gewichtung der verbleibenden Detektoren über diese Routen ebenfalls führen, um den Betrag der Routenbelastung gemindert. Bei der Auswahl des nächsten Detektors gehen diese Detektoren folglich mit geminderter Gewichtung in die Bewertung ein. Damit wird verhindert, dass Detektoren ausgewählt werden, die Informationen liefern, die durch vorher ausgewählte Detektoren bereits vorliegen. Gleichzeitig bestimmt das Verfahren eine optimale absolute Anzahl von Detektoren, da nach Abdeckung aller Routen die Auswahl beendet wird. Jeder weitere Detektor würde redundante Informationen liefern (vgl. auch **Yang / Zhou (1998)**).

Jedoch setzt die "Routen-Elimination" die Kenntnis über die Routenwahl voraus, die nicht immer in verlässlicher Qualität vorliegt. In diesen Fällen – insbesondere auch bei kleinen, wenig verzweigten Netzen – wird das hier entwickelte Verfahren der "Besten-Bewertung" empfohlen, das für jede Quelle-Ziel-Beziehung den jeweils besten Detektor "prämiiert". Aus der Überlagerung der einzelnen "Prämien" aller Quelle-Ziel-Beziehungen kann eine Rangfolge der wichtigsten Detektoren abgeleitet werden.

Im praktischen Einsatz besteht die Möglichkeit die Quelle-Ziel-Beziehungen und die möglichen Detektorstandorte zu gewichten, um somit Quelle-Ziel-Beziehungen von großem Interesse hervorzuheben bzw. Detektorstandorte (mit beispielsweise hohem Aufwand bei der Umsetzung) gering zu gewichten.

Erforderliche Eingabedaten

Die erforderlichen Eingabedaten des Verfahrens sind:

- eine historische bzw. planerische Quelle-Ziel-Matrix des Untersuchungsgebiets als Grundmatrix,
- die Kodierung und Eichung des Netzes in einem Programm, das ein Routensuch- und Umlegungsverfahren integriert hat, und
- die Ergebnisse der Umlegung der Grundmatrix, hier insbesondere die Indikatoren Belastung des Detektors (q_d) und (für

die "Routen-Elimination") Belastung der Routen an jedem Detektor (q_{dr}), die nach der Zuordnung der Detektoren auf die Routen bestimmt werden können (beides in Fz/Zeitintervall).

In der vorliegenden Untersuchung wurde das Programm VISUM (PTV AG) verwendet, da dort sowohl ein Routensuch- und Umlegungsverfahren als auch ein für die vergleichende Bewertung notwendiges Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren integriert sind.

Ergebnis des ausgewählten Detektorsatzes in Testgebiet

Das Auswahlverfahren „Routen-Elimination“ ermittelte im Testgebiet (Frankfurt/Main – Süd) einen optimalen Detektorsatz von 21 Detektoren aus der Menge von 156 möglichen Detektorstandorten, die auf den Kanten des Netzmodells definiert wurden. Bei der Analyse der Lage der ausgewählten Detektoren zeigt sich, dass Standorte an den Anbindungen von Zellen mit großer Belastung bevorzugt werden. Deshalb ist beim Aufbau des Netzmodells besonders auf eine realitätsnahe Anbindung der Zellen zu achten.

Bei der Evaluation des ausgewählten Detektorsatzes wurden zunächst die Abweichungen der mit dem Detektorsatz angepassten Matrix von einer festgelegten Vergleichsmatrix bewertet. Dazu wurden virtuelle Soll-Matrizen definiert, die (zufällig) in einem Intervall von der Grundmatrix abweichen. Mit diesen Soll-Matrizen wurden durch Umlegung die „neuen“ Werte des Detektorsatzes bestimmt. Diese wurden anschließend zur Matrixschätzung herangezogen. Die Abweichung zwischen Soll-Matrix und Schätz-Matrix diente der ersten Bewertung. Schwankte die Soll-Matrix im Intervall kleiner +/- 10% um die Grundmatrix, erreichte der ausgewählte Detektorsatz ein mittleres Abweichungsquadrat von unter etwa 5 Fz/h. Um im praktischen Einsatz des Verfahrens gute Ergebnisse zu erzielen, ist also darauf zu achten, dass die Grundmatrix von der zu schätzenden Situation nicht zu stark abweicht.

Die Wahl einer geeigneten Grundmatrix für eine bestimmte Tageszeit bzw. für ein Ereignis wird mit zunehmender Dauer des Einsatzes des Verfahrens einfacher, da durch die Aufzeichnung der generierten Matrizen

für bestimmte Verkehrssituationen eine Bibliothek von Grundmatrizen angelegt wird, aus der geschöpft werden kann.

Schlussfolgerung

Abschließend kann gesagt werden, dass mit der „Routen-Elimination“ ein Verfahren vorliegt, das mit verhältnismäßig geringem Aufwand einen optimalen Detektorsatz für die Nachfrageermittlung bestimmt. Bei fehlender Kenntnis der Routenwahl kann auf das einfachere Verfahren der "Besten-Bewertung" zurückgegriffen werden.

Zur Vorbereitung von Quelle-Ziel-Matrix-basierten Online-Simulationsmodellen und Offline-Anwendungen ist damit ein weiterer Baustein zur Bestimmung des Detektorsatzes geleistet.

Der ermittelte Detektorsatz zeigt sich robust gegenüber Veränderungen der Routenwahl, wenn diese von der Grundlage nicht zu stark abweichen. Die mit dem ermittelten Detektorsatz zu erzielende Qualität der Ergebnisse ist jedoch abhängig von der Qualität der Eichung des Netzmodells und der Leistungsfähigkeit der eingesetzten externen Verfahren.

10. Ausblick

Validierung der Verfahren

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden die Verfahren anhand der Ergebnisse der mit ihnen ermittelten Detektorsätze validiert. Zum Einen wurden die mit dem Detektorsatz geschätzten Quelle-Ziel-Matrizen bewertet. Zum Anderen wurde die jeweilige Quelle-Ziel-Matrix auf das Netz umgelegt und die so ermittelten Kantenbelastungen bewertet.

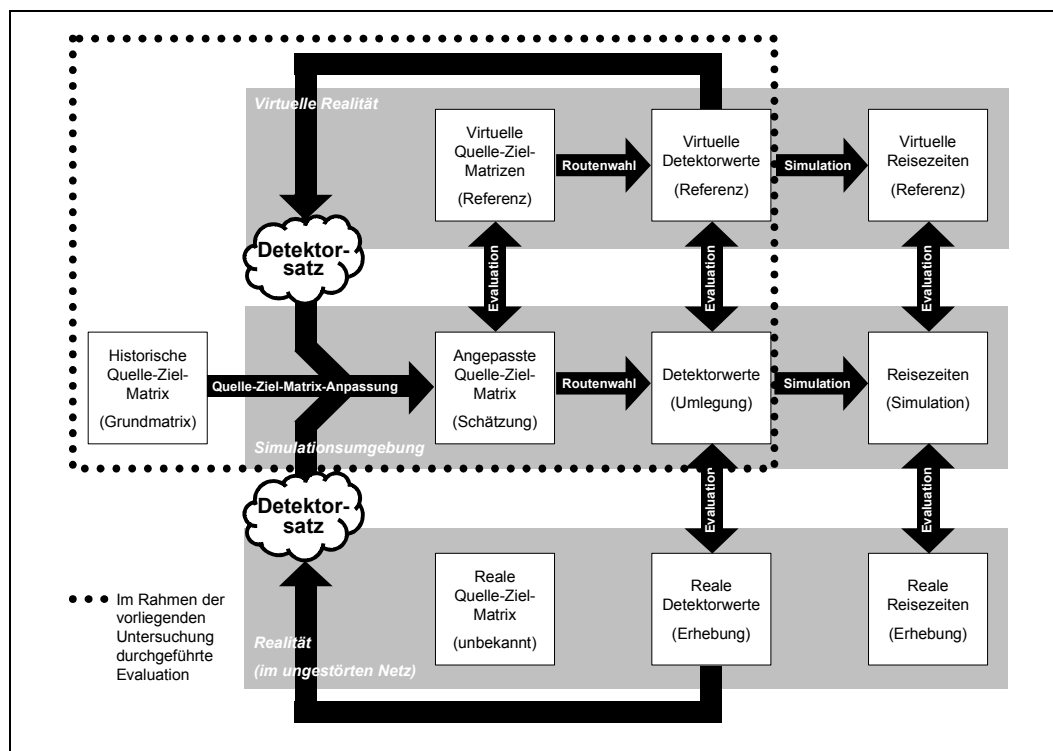


Bild 59: Validierung des ermittelten Detektorsatzes

Folgende Schritte, die im Rahmen dieser Arbeit nicht realisiert werden konnten, werden für zukünftige Entwicklungen empfohlen (**Bild 59**):

- Validierung der Ergebnisse durch den Einsatz weiterer Netze

Die hier entwickelten Verfahren sind für weitere Netze anzuwenden. Die Untersuchungsumgebung ODeFIX erlaubt (bei Verfügbarkeit von VISUM und VISUMonline) ein einfaches Testen von allen Netzen die in VISUM (PTV AG) kodiert wurden.

- Validierung im Praxiseinsatz in realen Verkehrsverhältnissen,
Durch Bestimmung des minimalen Detektorsatzes für ein Testgebiet, das bereits flächendeckend mit Erfassungsquerschnitten ausgestattet ist, kann die praktische Einsatzfähigkeit durch den Vergleich der mit dem ermittelten Detektorsatz gewonnenen Informationen zu den flächendeckend erfassten Informationen validiert werden.
- Validierung der Verwendung der Ergebnisse für den Einsatz einer mikroskopischen Simulation,
Eines der wesentlichen Anwendungsgebiete von Quelle-Ziel-Matrizen ist die mikroskopische Simulation. Die Möglichkeiten des Einsatzes der geschätzten Quelle-Ziel-Matrizen für diesen Anwendungsfall sind zu validieren.
- Weitergehender Vergleich der Verfahren mit alternativen Ansätzen aus der Literatur,
Ein Vergleich mit alternativen Verfahren konnte im Rahmen dieser Arbeit (teilweise bedingt durch parallele Entwicklungszeiträume) nur auf theoretischer Basis durchgeführt werden. Für die alternativen Ansätze (beispielsweise von **Bianco et al. (2001)**) liegen in der Regel programmierte Lösungen vor. Eine Kontaktaufnahme mit den jeweiligen Entwicklern für einen Austausch der untersuchten Netze wird empfohlen.

Weiterer Entwicklungsbedarf der Verfahren

Die Entwicklungen im Rahmen dieser Arbeit konzentrierten sich auf die Nachfrageerfassung. In diesem Feld sind folgende Punkte bei weitergehenden Untersuchungen zu berücksichtigen:

- Anforderungen an die Eingangsdaten,
Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren sowie die alternativen Verfahren aus der Literatur stellen in gleicher Weise hohe Anforderungen an die Eingangsdaten. Bei allen Verfahren wird die Kenntnis über eine historische Quelle-Ziel-Matrix vorausgesetzt.

Diese liegt jedoch in den seltensten Fällen in geeigneter Weise für das Untersuchungsgebiet vor. Wie in dieser Arbeit muss die Quelle-Ziel-Matrix häufig aus planerischen Quellen (Befragungen etc.) hergeleitet werden, hier aus einer 24h-Matrix, die für ein viel größeres und größeres Netz vorlag.

Dies führt zu Entwicklungsbedarf in zwei Bereichen: Zum Einen ist die Datengrundlage zu verbessern. Es ist eine Bibliothek von Quelle-Ziel-Matrizen für unterschiedliche Situationen anzulegen, auf die bei der Anpassung zurückgegriffen werden kann. Dazu gilt es Methoden und Verfahren weiterzuentwickeln. Zum Anderen ist nach der Möglichkeit zu forschen, mit geringerer Abhängigkeit von Eingangsdaten Detektoren auszuwählen.

- Vereinfachung der Verfahren für die praktische Anwendung,

Wie bei Gesprächen mit Anwendern aus der Praxis deutlich wurde, besteht dort die Erwartungshaltung, ganz einfache Faustregeln für den praktischen Einsatz an die Hand zu bekommen. Dazu ist es erforderlich, bei der Analyse der Anwendung sehr komplexer Verfahren (wie beispielsweise die Ansätze von **Yang / Zhou (1998)**) zu überprüfen, inwieweit aus den Ergebnissen Gesetzmäßigkeiten abzuleiten sind.

Zusätzlich zur hier behandelten Nachfrageerfassung gibt es weitere Randbedingungen, welche die Lage und Anzahl von Detektorstandorten beeinflussen.

- Untersuchung der Auswirkungen der Integration von Floating Car Data (FCD) auf die Anzahl der erforderlichen Detektorstandorte. Die Integration von FCD ist beispielsweise im System *DINOonline* (**Logi, F./ Ullrich, M. / Keller, H. (2001)**) vorgesehen.
- Untersuchung der Möglichkeiten, weitere Verkehrskenngrößen für den Informationsgewinn heranzuziehen (z.B. Geschwindigkeiten, LSA-Steuerungen) und deren Wirkung auf die erforderliche Anzahl von Detektorstandorten.

- Untersuchung der Detektion von Störfällen im innerstädtischen Straßennetz und deren Auswirkungen auf die erforderliche Anzahl von Detektorstandorten.

Die Störfallerkennung in der innerstädtischen Netzen stellt neue Anforderungen an die Lage und Art von Detektoren. Gerade im Hinblick auf die für die Verkehrsteilnehmer interessanten Informationen dürfen die Störfälle nicht vernachlässigt werden.

Quellenverzeichnis und Bibliographie

Bell, M. / Shield, C. (1994)

A stochastic user equilibrium (S.U.E) path flow estimator for urban road networks.

in: How to control Mobility,

Hrg.: MET – Ministère Wallon de l'équipement et des transports

URL: <http://met.wallonie.be/metpub/src/trafic06/p21.html> (vom 10.12.1

Bianco, L. et al. (2001)

A Network Based Model for Traffic Sensor Location with Implications on O/D Matrix Estimates

in: Transportation Science, Vol. 35, No. 1, Feb, 2001

Bosserhoff, D. (1985)

Statische Verfahren zur Ermittlung von Quelle-Ziel-Matrizen im Öffentlichen Personennahverkehr – Ein Vergleich.

Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe

Karlsruhe, 1985

Bosserhoff, D. (1986)

Bestimmung von Quelle-Ziel-Matrizen mit Hilfe des Entropie-Verfahrens.

in: Der Nahverkehr, Heft 2, 1986, Seiten 56-62

Braun J. / Wermuth M. (1973)

Konzept und Programmsystem eines analytischen Gesamtverkehrsmodells.

in: Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Verkehrswesen der Technischen Universität München
München, 1973

Brilon, W. et al. (Hrg.) (1999)

Traffic and Mobility – Simulation, Economics, Environment.
Springer Verlag, 1999

Bronstein I.N. / Semendjajew K.A. (1989)

Taschenbuch der Mathematik.

Verlag Harri Deutsch, 1989

Collatz, L. / Wetterling, W. (1966)

Optimierungsaufgaben.
Springer Verlag 1966

Cremer, M. / Keller, H. (1982)

Ein dynamisches Verfahren zur Bestimmung der Herkunft-Ziel-
Matrizen aus Querschnittszählungen.
in: Straßenverkehrstechnik, Heft 2, 1982, Seiten 35-39

**FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
(1982)**

Hinweise für die Anwendung von Entscheidungs- und
Optimierungsmethoden im Verkehrswesen.
Köln, 1982

**FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
(1989)**

Begriffsbestimmungen.
Teil: Straßenplanung und Straßenverkehrstechnik.
Köln, 1989

**FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
(1995)**

Hinweise zur Schätzung von Verkehrsbeziehungen mit Hilfe von
Querschnittszählungen.
Köln, 1995

**FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
(1991)**

Merkblatt über Detektoren im Straßenverkehr.
Köln 1991

Grosso, S. / Bell, M. et al. (1998)

Application of the path flow estimator in Lyon, Piraeus, Toulouse and
Turin.
Interner Bericht.

Herz, R. / Schlichter, H. G. / Siegener, W. (1992)

Angewandte Statistik für Verkehrs- und Regionalplaner.
Düsseldorf, 1992

Hsu, Tien-Pen (1991)

Optimierung der Detektorlage bei verkehrsabhängiger
Lichtsignalsteuerung.

Institut für Verkehrswesen Universität Karlsruhe,

Schriftenreihe Heft 46

Karlsruhe 1991

Logi, F. / Ullrich, M. / Keller, H. (2001)

Traffic Estimation in Munich:

Practical Problems and Pragmatic Solutions,

Fourth International IEEE Conference on Intelligent

Transportation Systems,

Oakland, CA, 2001

Law, A.M. / Kelton, W.W. (1991)

Simulation Modeling & Analysis.

International Editions 1991

Maher, M.J. (1987)

Bias in the estimation of O-D flows from link counts

in: Traffic Engineering & Control, Heft Dez. 1987

Mathias, P. / Fellendorf, M. / Vortisch, P. (1999)

MONET – Dynamic network modeling in transport systems.

In: Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Transport
Systems in Toronto

Toronto, 1999

Maybeck, P.S. (1979)

Stochastic models, estimation and control, Volume 1.

1979

Müller-Merbach, H. (1969)

Operation research.

Verlag Franz Vahlen, 1969

Müller-Merbach, H. (1970)

Optimale Reihenfolgen.

Springer-Verlag, 1970

Ploss, G. (1992)

Ein Dynamisches Verfahren zur Schätzung von Verkehrsbeziehungen aus Querschnittszählungen. Dissertation an der Technischen Universität München, Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrswesen München, 1992

PTV (1998)

Handbuch VISUM.
Karlsruhe, 1998

Rothe, R. / Szabó, I. (1965)

Höhere Mathematik Teil I-VI.
Stuttgart, 1965

Schnabel, W. / Lohse, D. (1997)

Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Bd. 1+2
Berlin, 1997

Stucke, G. (1979)

Ermittlung der Teilströme aus Querschnittsmessungen. Vorläufiger Bericht Nr. 24, Institut für Verkehrswesen Karlsruhe
Karlsruhe, 1979

Stucke, G. (1985)

Bestimmung der städtischen Fahrtenmatrix durch Verkehrszählungen. Institut für Verkehrswesen Universität Karlsruhe, Schriftenreihe Heft 33
Karlsruhe 1985

Van Zuylen, H. (1979)

The estimation of turning flows on a junction.
in: Traffic Engineering & Control, Nov. 1979, Seiten 539-540

Van Zuylen, H. / Willumsen, L.G. (1980)

The most likely Trip Matrix estimation from Traffic Counts.
in: Transportation Research, Seiten 281-293,
1980

Willumsen, L.G. (1978)

Estimation of an O-D-matrix from traffic counts.
Institute for Transportation Studies, University of Leeds,
Leeds 1978

Yang, H. / Zhou, J. (1998)

Optimal traffic counting locations for origins-destination matrix
estimation.
in: Transportation Research, Part B, Vol. 32, No.2, Seiten 109-126

Ziegler, H. (1989)

Die Erzeugung von Verkehrsverflechtungsmatrizen aus
Querschnittszählungen zur vereinfachten Ermittlung von
Verkehrsumlegungen.
Institut für Straßenwesen RWTH Aachen, Bericht 38,
Aachen, 1989

Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Untersuchungsmethode	13
Bild 2:	Bewertungsebenen	14
Bild 3:	Bewertung eines Detektorsatzes	16
Bild 4:	Beispiel zur Erläuterung des Prinzips des minimalen Informationsgewinns	21
Bild 5:	Fuzzy sets in VStromFuzzy	21
Bild 6:	Netzbeispiel PFE	22
Bild 7:	Logit Modell PFE	22
Bild 8:	Kostenfunktionen PFE	22
Bild 9:	Gleichgewichtszustand PFE	23
Bild 10:	Analyse der Schätzverfahren bei Gleichgewichtsumlegung	24
Bild 11:	Einfluss der Kapazität beim PFE	26
Bild 12:	Funktion der fuzzyfizierten Grenzen der Zählwerte bei VStromFuzzy	27
Bild 13:	Analyse der Schätzverfahren bei Umlegung nach Lernverfahren	28
Bild 14:	Umgeformtes Graphenmodell nach Yang / Zhou (1998)	33
Bild 15:	Einfluss den erhobenen Kontenpunktes v	34
Bild 16:	Differenzierung der Knoten eines Graphen	36
Bild 17:	Prinzipielle Funktionsweise der Auswahlverfahren mit und ohne Einbeziehung der Schätzergebnisse	40
Bild 18:	Einteilung der Auswahlverfahren	41
Bild 19:	Beispiel zur Erläuterung der Indikatoren	42
Bild 20:	Indikatoren aus Beispiel in Bild 19	45
Bild 21:	Auswahlregel "Besten-Bewertung" (Struktogramm)	47
Bild 22:	Auswahlregel "Besten-Bewertung" am Beispiel aus Bild 19	47
Bild 23:	Auswahlregel „Reihen-Bewertung“ (Struktogramm)	48
Bild 24:	Auswahlregel „Reihen-Bewertung“ am Beispiel aus Bild 19	49
Bild 25:	Auswahlregel „OD-Elimination“ (Struktogramm)	50
Bild 26:	Problematik Routenwahl	51
Bild 27:	Auswahlregel „OD-Elimination“ am Beispiel aus Bild 19	52
Bild 28:	Auswahlregel „Routen-Elimination“ (Struktogramm)	53
Bild 29:	Auswahlregel „Routen-Elimination“ am Beispiel aus Bild 19 ...	54
Bild 30:	Konstruktionsverfahren mit abnehmenden Freiheitsgrad	55
Bild 31:	Erwarteter optimaler Verlauf des mittleren Fehlerquadrats	56
Bild 32:	Auswahlregel mit Einbeziehung des Schätzergebnisses (Struktogramm)	57
Bild 33:	Räumliche Lage des Testgebiets	61
Bild 34:	Strategisches Straßennetz (MIV) im Testgebiet	61
Bild 35:	Verkehrszellen und Verkehrsstärke 7:00 bis 8:00 Uhr	62
Bild 36:	Verkehrszellen und Verkehrsstärke 16:00 bis 17:00 Uhr	62
Bild 37:	Bestimmung der zu untersuchenden Quelle-Ziel-Matrizen	63

Bild 38:	Versuchsaufbau zur vergleichenden Bewertung der Detektor-Auswahlverfahren	65
Bild 39:	Versuch zur Überprüfung des Einflusses der Routensuchverfahren	66
Bild 40:	Versuch zur Überprüfung des Einflusses der Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren	67
Bild 41:	Versuch zur Überprüfung des Einflusses der zugrunde gelegten Soll-Matrizen	68
Bild 42:	Anzahl der ermittelten Detektoren – Vergleich der Auswahlverfahren (Abkürzungen siehe Anlage 4).....	72
Bild 43:	Vergleich der Detektorsätze mit VStromFuzzy bei Soll-Matrix M10(1)v ($\Sigma=19.015$ Fz./h im Netz).....	73
Bild 44:	Differenznetz der Grundmatrix, umgelegt nach Gleichgewichtsverfahren und Lernverfahren (7:00-8:00 Uhr)..	76
Bild 45:	Vergleich der Abweichungen der geschätzten Matrizen bei Gleichgewichts- und Lernverfahren.....	77
Bild 46:	Differenznetz der Grundmatrix, umgelegt nach Gleichgewichtsverfahren und nach Path Flow Estimator (Delta=PFE – G).....	78
Bild 47:	Abweichungen der geschätzten Matrizen mit PFE bei Soll-Matrix M10(1)v	79
Bild 48:	Verlauf der Abweichungen der geschätzten Matrizen mit PFE beim Konstruktionsverfahren bei Soll-Matrix M10(1)v	80
Bild 49:	Einfluss der zugrunde gelegten Quelle-Ziel-Matrizen (VStromFuzzy)	81
Bild 50:	Vergleich der Detektorsätze beim Konstruktionsverfahren und beim Auswahlverfahren „Routen-Elimination“	82
Bild 51:	Zusammenfassende Bewertung der Auswahlverfahren	85
Bild 52:	Ermittelte Abweichung der Detektoren in der ersten Stufe	89
Bild 53:	Optimaler Detektorsatz für das Testgebiet (21 Detektoren)	91
Bild 54:	Differenznetz: M10(1)v (Soll) – M10(1)v (Schätz) bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h].....	92
Bild 55:	Durch Experte 1 ausgewählter Detektorsatz für das Testgebiet	
Bild 56:	Durch Experte 2 ausgewählter Detektorsatz für das Testgebiet.....	95
Bild 57:	Durch Experte 3 ausgewählter Detektorsatz für das Testgebiet.....	96
Bild 58:	Vergleichende Bewertung der Detektorsätze aus der Expertenbewertung	97
Bild 59:	Validierung des ermittelten Detektorsatzes	105

Im Anhang:

Bild 60:	Grundmatrix für die Quelle-Ziel-Matrix-Anpassung vormittags [Fz/h]	123
Bild 61:	Grundmatrix für die Quelle-Ziel-Matrix-Anpassung nachmittags [Fz/h]	123
Bild 62:	Soll-Matrix im Intervall +/- 5% Abweichung (vormittags) (1) [Fz/h]	124
Bild 63:	Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (5%) (vormittags) (1)	124
Bild 64:	Soll-Matrix im Intervall +/- 5% Abweichung (vormittags) (2) [Fz/h]	125
Bild 65:	Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (5%) (vormittags) (2)	125
Bild 66:	Soll-Matrix im Intervall +/- 5% Abweichung (vormittags) (3) [Fz/h]	126
Bild 67:	Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (5%) (vormittags) (3)	126
Bild 68:	Soll-Matrix im Intervall +/- 10% Abweichung (vormittags) (1) [Fz/h]	127
Bild 69:	Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (10%) (vormittags) (1)	127
Bild 70:	Soll-Matrix im Intervall +/- 10% Abweichung (vormittags) (2) [Fz/h]	128
Bild 71:	Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (10%) (vormittags) (2)	128
Bild 72:	Soll-Matrix im Intervall +/- 10% Abweichung (vormittags) (3) [Fz/h]	129
Bild 73:	Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (10%) (vormittags) (3)	129
Bild 74:	Soll-Matrix im Intervall +/- 20% Abweichung (vormittags) (1) [Fz/h]	130
Bild 75:	Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (20%) (vormittags) (1)	130
Bild 76:	Soll-Matrix im Intervall +/- 20% Abweichung (vormittags) (2) [Fz/h]	131
Bild 77:	Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (20%) (vormittags) (2)	131
Bild 78:	Soll-Matrix im Intervall +/- 20% Abweichung (vormittags) (3) [Fz/h]	132
Bild 79:	Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (20%) (vormittags) (3)	132

Bild 80:	Soll-Matrix im Intervall +/- 10% Abweichung (nachmittags) (1) [Fz/h]	133
Bild 81:	Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (10%) (nachmittags) (1)	133
Bild 82:	Soll-Matrix im Intervall +/- 10% Abweichung (nachmittags) (2) [Fz/h]	134
Bild 83:	Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (10%) (nachmittags) (2)	134
Bild 84:	Soll-Matrix im Intervall +/- 10% Abweichung (nachmittags) (3) [Fz/h]	135
Bild 85:	Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (10%) (nachmittags) (3)	135
Bild 86:	Systematische Kennzeichnung der Detektorsätze	136
Bild 87:	Systematische Kennzeichnung der Bewertungsergebnisse ..	136
Bild 88:	ODeFIX - Begrüßungsbildschirm.....	139
Bild 89:	ODeFIX – Eingabemaske Netzmodell und Umlegungsergebnisse.....	140
Bild 90:	ODeFIX – Detektorsuchfunktion.....	141
Bild 91:	ODeFIX - Eingabemaske für eingesetzte Verfahren	142
Bild 92:	ODeFIX – Ergebnisausgabe: Abweichungsverlauf (Auswahl)	143
Bild 93:	ODeFIX – Ergebnisausgabe: Abweichungsverlauf (Grafik)...	143
Bild 94:	ODeFIX – Ergebnisausgabe: Detektorstandorte (Auswahl) ..	144
Bild 95:	ODeFIX – Ergebnisausgabe: Detektorstandorte (Grafik)	144
Bild 96:	Vergleich der Parameter der "Besten-Bewertung" mit der Matrix M10(1)v bei Gleichgewichtsumlegung der Grundmatrix.....	147
Bild 97:	Vergleich der Parameter der "Besten-Bewertung" mit der Matrix M20(1)v bei Gleichgewichtsumlegung der Grundmatrix.....	147
Bild 98:	Vergleich der Parameter der „Reihen-Bewertung“ mit der Matrix M10(1)v bei Gleichgewichtsumlegung der Grundmatrix.....	148
Bild 99:	Vergleich der Parameter der „Reihen-Bewertung“ mit der Matrix M20(1)v bei Lernverfahrenumlegung der Grundmatrix.....	148
Bild 100:	Vergleich der Auswahlregeln bei M10(1)v G VS	149
Bild 101:	Vergleich der Auswahlregeln bei M20(1)v G VS	149
Bild 102:	Vergleich der Auswahlregeln bei M10(1)v L VS	150
Bild 103:	Vergleich der Auswahlregeln bei M20(1)v L VS	150
Bild 104:	Differenz der Matrizen: M10(1)v (Soll) – M10(1)v (Schätz) ...	151
Bild 105:	Differenznetz: M10(1)v (Soll) – M10(1)v (Schätz) bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h].....	151
Bild 106:	Differenz der Matrizen: M10(2)v (Soll) – M10(2)v (Schätz) ...	152
Bild 107:	Differenznetz: M10(2)v (Soll) – M10(2)v (Schätz) bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h].....	152
Bild 108:	Differenz der Matrizen: M10(3)v (Soll) – M10(3)v (Schätz) ...	153

Bild 109:	Differenznetz: $M10(3)v$ (Soll) – $M10(3)v$ (Schätz) bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h].....	153
Bild 110:	Differenz der Matrizen: $M20(1)v$ (Soll) – $M20(1)v$ (Schätz) ...	154
Bild 111:	Differenznetz: $M20(1)v$ (Soll) – $M20(1)v$ (Schätz) bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h].....	154
Bild 112:	Differenz der Matrizen: $M20(2)v$ (Soll) – $M20(2)v$ (Schätz) ...	155
Bild 113:	Differenznetz: $M20(2)v$ (Soll) – $M20(2)v$ (Schätz) bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h].....	155
Bild 114:	Differenz der Matrizen: $M20(3)v$ (Soll) – $M20(3)v$ (Schätz) ...	156
Bild 115:	Differenznetz: $M20(3)v$ (Soll) – $M20(3)v$ (Schätz) bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h].....	156
Bild 116:	Differenz der Matrizen: $M10(1)n$ (Soll) – $M10(1)n$ (Schätz)...	157
Bild 117:	Differenznetz: $M10(1)n$ (Soll) – $M10(1)n$ (Schätz) bei Gleichgewichtsumlegung	157
Bild 118:	Differenz der Matrizen: $M10(2)n$ (Soll) – $M10(2)n$ (Schätz)...	158
Bild 119:	Differenznetz: $M10(2)n$ (Soll) – $M10(2)n$ (Schätz) bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h].....	158
Bild 120:	Differenz der Matrizen: $M10(3)n$ (Soll) – $M10(3)n$ (Schätz)...	159
Bild 121:	Differenznetz: $M10(3)n$ (Soll) – $M10(3)n$ (Schätz) bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h].....	159
Bild 122:	Differenz der Matrizen: $M100v$ (Soll) – $M100v$ (Schätz)	160
Bild 123:	Differenznetz: $M100v$ (Soll) – $M100v$ (Schätz) bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h].....	160

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Diskussion unterschiedlicher Abweichungsparameter	120
Anlage 2: Untersuchte Quelle-Ziel-Matrizen	123
Anlage 3: Nomenklatur der Bewertungsergebnisse	136
Anlage 4: Versuchsplan zur Definition der Detektorsätze.....	137
Anlage 5: Funktionsweise des entwickelten Programms ODeFIX.....	139
Anlage 6: Vergleich der Standorte der definierten Detektorsätze.....	145
Anlage 7: Vergleich des Qualitätsverlaufs der definierten Detektorsätze	147
Anlage 8: Ergebnisse der Evaluation des optimalen Detektorsatzes im Testgebiet	151
Anlage 9: Abkürzungen	161

Anlage 1: Diskussion unterschiedlicher Abweichungsparameter

Die Differenz zwischen der virtuellen Soll-Matrix und der geschätzten Matrix wird zur vergleichenden Bewertung der mit den Auswahlregeln definierten Detektorsätze herangezogen. Diese Differenz kann auf unterschiedliche Weise interpretiert werden. Die mittlere absolute Abweichung allein weist einige Schwächen auf, bspw. ergeben die beiden Abweichungen $\Delta f_1 = -500$ und $\Delta f_2 = +500$ im Mittel eine Abweichung von Null. Unter Berücksichtigung dieses Problems wurden im Rahmen der Versuche sechs unterschiedliche Abweichungsparameter definiert und auf ihre Tauglichkeit hinsichtlich des vorliegenden Problems untersucht.

$$A1 = \overline{\Delta f_{\text{abs}}^2} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (f_{i,\text{soll}} - f_{i,\text{geschätzt}})^2$$

A1 wurde definiert aus dem sogenannten „mittleren Fehlerquadrat“. Hierzu wird die absolute Abweichung jeder Beziehung der geschätzten Matrix zur Soll-Matrix quadriert und dann gemittelt. Einzelne sehr große Abweichungen werden dabei stärker berücksichtigt. Eine Abweichung von zwei Beziehungen von je 50 Fahrzeugen ($A1=2500$) wird beispielsweise besser bewertet als zwei Abweichung von 0 und 100 Fahrzeugen ($A1=5000$).

$$A2 = \left| \overline{\Delta f_{\text{abs}}} \pm s_{\text{abs}} \right| \quad \text{mit} \quad \overline{\Delta f_{\text{abs}}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n f_{i,\text{soll}} - f_{i,\text{geschätzt}}$$

$$s_{\text{abs}} = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n \left((f_{i,\text{soll}} - f_{i,\text{geschätzt}}) - \overline{\Delta f_{\text{abs}}} \right)^2$$

A2 setzt sich zusammen dem Betrag der mittleren absoluten Abweichung plus bzw. minus der Standardabweichung des Mittelwerts. Die Standardabweichung gibt Aufschluss darüber, wie gleichmäßig die Abweichung der geschätzten Matrix ist. Eine hohe mittlere Abweichung mit einer geringen Standardabweichung bedeutet beispielsweise, dass die geschätzte Matrix mit ihren Werten gleichmäßig zu hoch liegt. Eine kleine mittlere Abweichung mit einer hohen Standardabweichung bedeutet hingegen,

dass sich die Fehler der geschätzten Matrix im Mittel ausgleichen, d. h. die richtige Anzahl von Fahrzeugen im System ist, diese nur falsch verteilt sind.

$$A3 = \overline{(|\Delta f_{\text{abs}}|)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |f_{i,\text{soll}} - f_{i,\text{geschätzt}}|$$

A3 ist definiert als die mittlere absolute Abweichung im Betrag. Durch die Mittelung der betraglichen Abweichung werden Schwankungen der Einzelwerte um den Nullpunkt neutralisiert. Abweichungen von $\Delta f_1 = -500$ und $\Delta f_2 = +500$ werden im Mittel dadurch genauso schlecht bewertet wie Abweichungen von $\Delta f_1 = +500$ und $\Delta f_2 = +500$.

Im Gegensatz zu den Abweichungsparametern A1 bis A3, die Funktionen der absoluten Abweichung sind, basieren die Abweichungsparameter A4 bis A6 auf der relativen Abweichung der geschätzten von der virtuellen Matrix.

Yang/Zhou (1998) definierten einen „maximum possible relative error“ (MPRE) zur Beurteilung der Qualität der geschätzten Quelle-Ziel-Matrix. Übersetzt in die in dieser Untersuchung verwendete Schreibweise wird der MPRE aus der Wurzel des mittleren relativen Fehlerquadrats definiert.

$$\text{MPRE} = \max \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta f_{\text{rel}}^2}{n}} \quad \text{mit } \Delta f_{\text{rel}} = \frac{f_{i,\text{geschätzt}} - f_{i,\text{soll}}}{f_{i,\text{soll}}} \quad)^{16}$$

Die Beurteilung anhand der relativen Abweichung hat den Nachteil, dass gering belastete Quelle-Ziel-Beziehungen, die im Verhältnis zu ihrer Größe extrem abweichen, das Bewertungsergebnis stark beeinflussen. Beispielsweise wird eine Abweichung von $f_{i,\text{soll}} = 5$ Fz zu $f_{i,\text{geschätzt}} = 10$ Fz durch die relative Abweichung von 100% schlechter bewertet als eine Abweichung von $f_{i,\text{soll}} = 1000$ Fz zu $f_{i,\text{geschätzt}} = 1300$ Fz mit einer relativen Abweichung von 30%.

¹⁶ nach Yang/Zhou (1998)

Um die tatsächliche Wirkung dieses Nachteils der Bewertung auf die Auswahl von Detektoren zu testen, werden der Vollständigkeit halber analog zu den absoluten Abweichungsparametern A1 bis A3 die relativen Abweichungsparameter A4 bis A6 definiert und getestet.

$$A4 = \overline{\Delta f_{\text{rel}}^2} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{i,\text{soll}} - f_{i,\text{schätz}}}{f_{i,\text{soll}}} \right)^2$$

$$A5 = \left| \overline{\Delta f_{\text{rel}}} \pm s_{\text{rel}} \right| \quad \text{mit} \quad \overline{\Delta f_{\text{rel}}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{f_{i,\text{soll}} - f_{i,\text{schätz}}}{f_{i,\text{soll}}}$$

$$s_{\text{rel}} = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{f_{i,\text{soll}} - f_{i,\text{schätz}}}{f_{i,\text{soll}}} \right) - \overline{\Delta f_{\text{rel}}} \right)^2$$

$$A6 = \overline{(|\Delta f_{\text{rel}}|)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{f_{i,\text{soll}} - f_{i,\text{schätz}}}{f_{i,\text{soll}}} \right|$$

Anlage 2: Untersuchte Quelle-Ziel-Matrizen

	73	74	80	81	82	83	84	85	1189	3000	3001	3002	3003	3004	3005	3006	3007	3008	3009	3010
73	4	8	0	2	4	1	11	2	0	146	10	70	3	73	28	26	0	28	0	21
74	1	3	1	1	3	1	4	1	0	62	25	10	1	46	7	0	9	0	0	48
80	1	3	2	1	1	1	4	2	0	37	14	4	0	32	5	0	5	0	0	27
81	6	22	5	18	11	8	46	4	0	182	13	51	7	98	2	55	42	1	0	351
82	6	21	5	11	22	9	51	3	0	225	12	113	6	221	10	32	52	1	1	185
83	1	1	0	0	0	1	3	0	0	6	0	5	0	2	1	1	1	0	0	36
84	1	1	1	1	1	0	4	0	0	10	2	15	0	7	0	4	3	0	0	81
85	0	0	0	0	0	0	1	0	0	7	0	2	0	11	0	6	1	1	0	9
1189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
3000	237	654	91	132	95	64	431	29	0	0	2	102	32	151	220	0	3	26	0	100
3001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	565	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3002	0	125	20	68	83	44	323	0	0	34	0	0	18	996	0	0	0	0	0	68
3003	0	0	0	16	0	0	0	0	0	149	7	48	0	10	0	22	7	2	0	55
3004	132	118	34	50	124	44	255	83	1	1277	23	1212	0	0	20	689	84	39	0	0
3005	0	111	3	0	0	0	6	0	0	338	0	0	6	0	0	0	0	0	0	89
3006	129	1	13	39	29	21	154	62	0	0	0	0	7	262	0	0	0	16	0	13
3007	22	187	24	75	105	45	284	23	0	468	0	11	15	0	0	0	0	1	1	37
3008	146	21	12	9	6	6	21	13	0	270	0	6	0	86	0	207	0	0	0	50
3009	12	43	6	0	16	12	431	5	0	38	22	89	0	12	7	18	45	1	0	0
3010	33	426	81	250	236	173	824	18	7	237	177	51	0	0	38	22	23	5	0	0

Bild 60: Grundmatrix für die Quelle-Ziel-Matrix-Anpassung vormittags [Fz/h]

	73	74	80	81	82	83	84	85	1189	3000	3001	3002	3003	3004	3005	3006	3007	3008	3009	3010	3011
73	6	2	0	6	7	0	0	2	0	150	0	107	0	82	44	32	3	86	8	19	5
74	4	3	3	14	15	0	1	0	0	271	84	9	0	214	17	0	103	6	22	236	21
80	2	3	4	5	6	0	1	1	0	53	15	2	0	70	5	0	32	2	3	45	1
81	3	2	5	55	20	4	4	4	0	54	10	93	11	71	4	18	91	5	0	273	15
82	4	4	5	22	56	2	4	4	0	67	26	99	0	201	7	21	119	6	11	126	7
83	1	1	1	5	6	1	1	0	0	11	7	26	0	18	0	9	27	1	8	155	3
84	7	3	3	29	34	3	4	1	0	49	17	186	0	215	0	45	127	9	317	708	10
85	2	0	1	5	6	0	0	0	0	22	1	3	0	57	0	46	9	12	3	31	3
1189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
3000	152	75	41	191	218	15	19	18	0	0	4	109	88	980	285	0	388	258	32	370	5
3001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	196	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3002	4	16	5	83	92	8	21	0	0	97	0	0	79	808	0	0	3	0	69	66	16
3003	1	0	0	2	0	1	0	0	0	5	17	41	0	0	0	2	0	1	0	0	0
3004	80	9	8	43	89	0	0	24	1	284	16	803	0	0	9	469	88	59	0	0	0
3005	0	8	3	0	0	0	0	0	0	76	0	0	4	0	0	0	0	0	0	30	0
3006	66	0	4	57	60	6	9	30	0	0	0	5	228	0	0	0	0	212	30	21	85
3007	13	14	10	55	74	4	15	9	0	267	2	49	0	0	0	0	0	6	28	5	0
3008	35	2	4	9	2	0	0	8	0	60	0	0	0	52	0	95	0	0	1	3	0
3009	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	34	0	0	0	0
3010	16	57	60	280	202	34	85	3	0	221	131	30	2	0	47	0	24	13	0	0	0
3011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bild 61: Grundmatrix für die Quelle-Ziel-Matrix-Anpassung nachmittags [Fz/h]

	73	74	80	81	82	83	84	85	1189	3000	3001	3002	3003	3004	3005	3006	3007	3008	3009	3010	3011
73	4	8	0	2	4	1	11	2	0	148	10	69	3	71	29	27	0	28	0	21	0
74	1	3	1	1	3	1	4	1	0	61	24	10	1	45	7	0	9	0	0	50	0
80	1	3	2	1	1	1	4	2	0	37	14	4	0	33	5	0	5	0	0	27	0
81	6	21	5	18	11	8	48	4	0	191	13	53	7	101	2	53	41	1	0	356	0
82	6	21	5	11	22	9	53	3	0	222	12	116	6	230	10	32	53	1	1	186	0
83	1	1	0	0	0	1	3	0	0	6	0	5	0	2	1	1	1	0	0	37	0
84	1	1	1	1	1	0	4	0	0	10	2	15	0	7	0	4	3	0	0	79	0
85	0	0	0	0	0	0	1	0	0	7	0	2	0	11	0	6	1	1	0	9	0
1189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3000	244	651	87	138	97	64	412	29	0	0	2	107	32	157	230	0	3	26	0	100	0
3001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	572	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3002	0	131	21	65	85	44	310	0	0	35	0	0	18	1021	0	0	0	0	0	67	0
3003	0	0	0	16	0	0	0	0	0	148	7	49	0	10	0	21	7	2	0	53	0
3004	135	116	35	48	124	46	267	86	1	1293	24	1223	0	0	21	721	87	40	0	0	0
3005	0	115	3	0	0	0	6	0	0	347	0	0	6	0	0	0	0	0	0	93	0
3006	124	1	13	40	28	20	150	65	0	0	0	0	7	270	0	0	0	16	0	13	0
3007	23	190	23	77	101	44	286	22	0	445	0	11	15	0	0	0	0	1	1	36	0
3008	152	20	12	9	6	6	22	13	0	269	0	6	0	82	0	207	0	0	0	50	0
3009	12	41	6	0	16	12	433	5	0	37	23	88	0	12	7	18	46	1	0	0	0
3010	34	432	81	261	244	174	832	18	7	228	185	51	0	0	38	22	24	5	0	0	0
3011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bild 62: Soll-Matrix im Intervall +/- 5% Abweichung (vormittags) M5(1) [Fz/h]

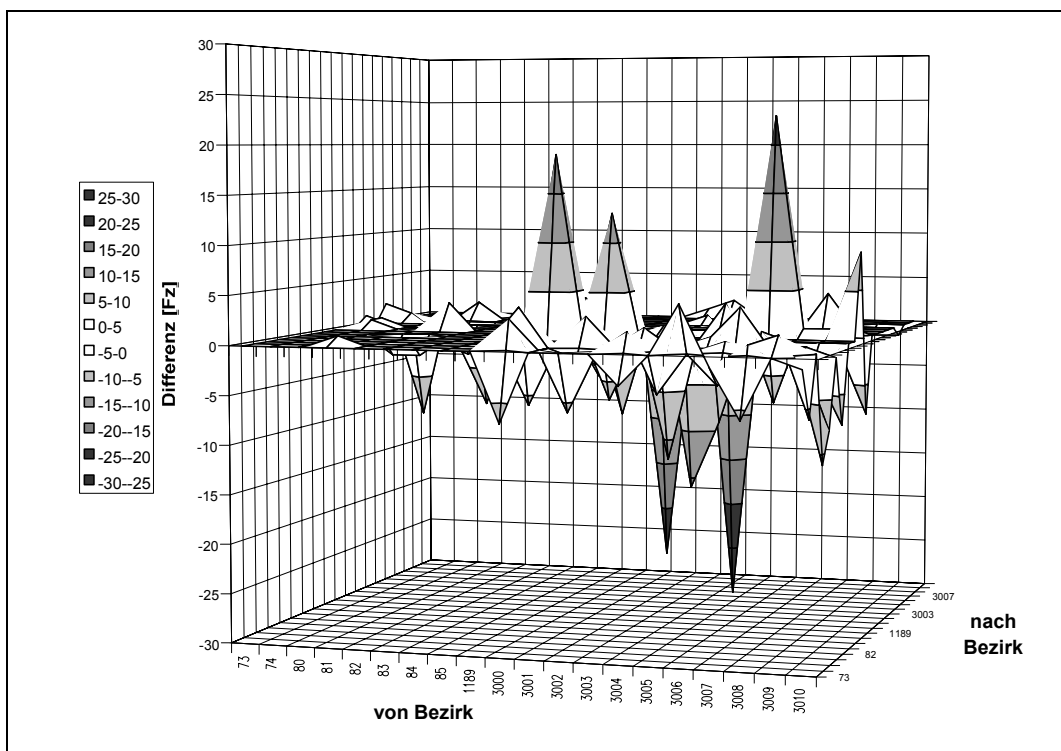


Bild 63: Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (5%) (vormittags) M5(1)

	73	74	80	81	82	83	84	85	1189	3000	3001	3002	3003	3004	3005	3006	3007	3008	3009	3010	3011
73	4	8	0	2	4	1	11	2	0	143	10	69	3	70	29	26	0	28	0	20	0
74	1	3	1	1	3	1	4	1	0	63	24	10	1	48	7	0	9	0	0	49	0
80	1	3	2	1	1	1	4	2	0	38	14	4	0	33	5	0	5	0	0	26	0
81	6	23	5	18	11	8	47	4	0	177	13	53	7	98	2	57	44	1	0	345	0
82	6	21	5	11	22	9	50	3	0	227	12	113	6	230	10	32	51	1	1	184	0
83	1	1	0	0	0	1	3	0	0	6	0	5	0	2	1	1	1	0	0	37	0
84	1	1	1	1	1	0	4	0	0	10	2	15	0	7	0	4	3	0	0	83	0
85	0	0	0	0	0	0	1	0	0	7	0	2	0	11	0	6	1	1	0	9	0
1189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3000	226	656	92	136	95	63	414	28	0	0	2	107	33	148	213	0	3	26	0	104	0
3001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	592	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3002	0	128	19	68	83	43	337	0	0	34	0	0	18	948	0	0	0	0	0	69	0
3003	0	0	0	16	0	0	0	0	0	146	7	46	0	10	0	22	7	2	0	56	0
3004	130	123	35	50	125	43	261	81	1	1335	23	1268	0	0	21	672	84	40	0	0	0
3005	0	111	3	0	0	0	6	0	0	335	0	0	6	0	0	0	0	0	0	87	0
3006	130	1	13	40	28	22	158	59	0	0	0	0	7	264	0	0	0	16	0	13	0
3007	22	190	23	74	105	43	293	22	0	445	0	11	15	0	0	0	0	1	1	36	0
3008	139	22	12	9	6	6	22	13	0	261	0	6	0	84	0	214	0	0	0	52	0
3009	12	44	6	0	16	12	448	5	0	38	21	88	0	12	7	18	43	1	0	0	0
3010	34	429	77	239	225	181	793	18	7	226	172	52	0	0	37	22	23	5	0	0	0
3011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bild 64: Soll-Matrix im Intervall +/- 5% Abweichung (vormittags) M5(2) [Fz/h]

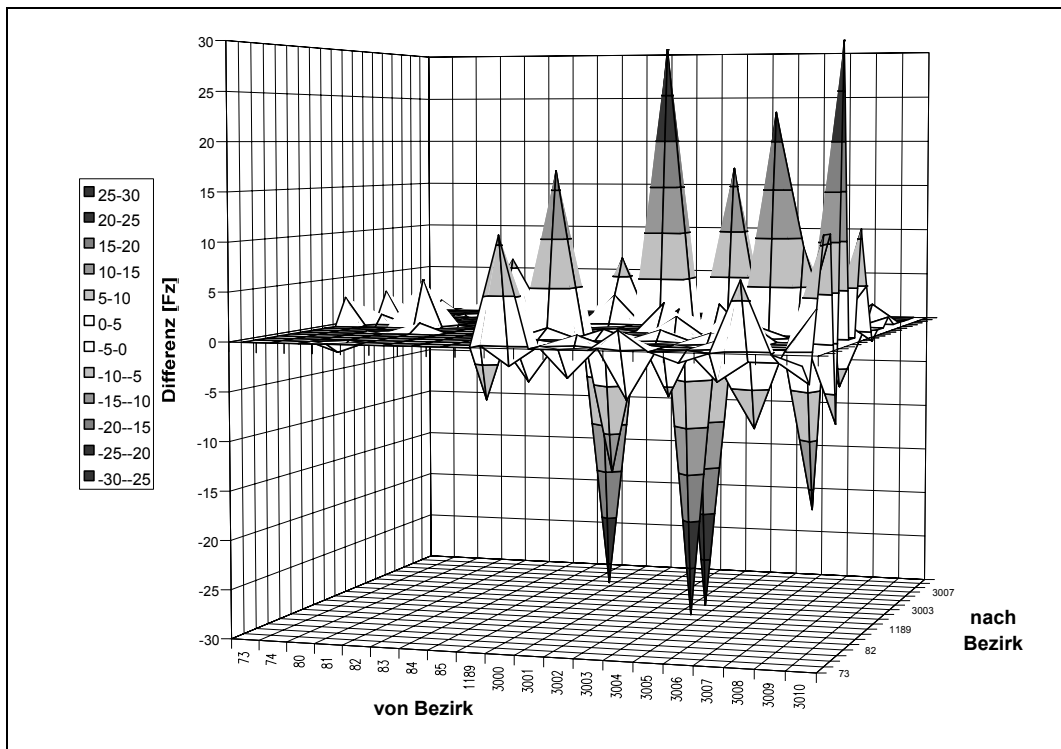


Bild 65: Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (5%) (vormittags) M5(2)

	73	74	80	81	82	83	84	85	1189	3000	3001	3002	3003	3004	3005	3006	3007	3008	3009	3010	3011
73	4	8	0	2	4	1	11	2	0	139	10	72	3	73	29	26	0	28	0	21	0
74	1	3	1	1	3	1	4	1	0	64	26	10	1	45	7	0	9	0	0	48	0
80	1	3	2	1	1	1	4	2	0	37	14	4	0	32	5	0	5	0	0	26	0
81	6	22	5	18	11	8	44	4	0	186	13	50	7	99	2	56	42	1	0	342	0
82	6	21	5	11	21	9	49	3	0	231	12	110	6	217	10	31	52	1	1	178	0
83	1	1	0	0	0	1	3	0	0	6	0	5	0	2	1	1	1	0	0	36	0
84	1	1	1	1	1	0	4	0	0	10	2	15	0	7	0	4	3	0	0	85	0
85	0	0	0	0	0	0	1	0	0	7	0	2	0	11	0	6	1	1	0	9	0
1189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3000	240	631	88	136	94	63	418	28	0	0	2	101	31	148	225	0	3	26	0	103	0
3001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	569	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3002	0	126	21	67	86	46	335	0	0	34	0	0	18	985	0	0	0	0	0	65	0
3003	0	0	0	16	0	0	0	0	0	146	7	47	0	10	0	22	7	2	0	55	0
3004	133	122	34	49	126	43	247	81	1	1299	22	1221	0	0	19	676	84	40	0	0	0
3005	0	108	3	0	0	0	6	0	0	349	0	0	6	0	0	0	0	0	0	90	0
3006	134	1	13	40	30	20	153	64	0	0	0	0	7	255	0	0	0	16	0	13	0
3007	21	188	23	73	109	43	282	24	0	447	0	11	15	0	0	0	0	1	1	38	0
3008	141	22	12	9	6	6	21	13	0	276	0	6	0	90	0	206	0	0	0	51	0
3009	12	42	6	0	16	12	448	5	0	37	21	90	0	12	7	18	46	1	0	0	0
3010	32	428	80	260	226	167	802	18	7	241	175	51	0	0	37	21	22	5	0	0	0
3011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bild 66: Soll-Matrix im Intervall +/- 5% Abweichung (vormittags) M5(3) [Fz/h]

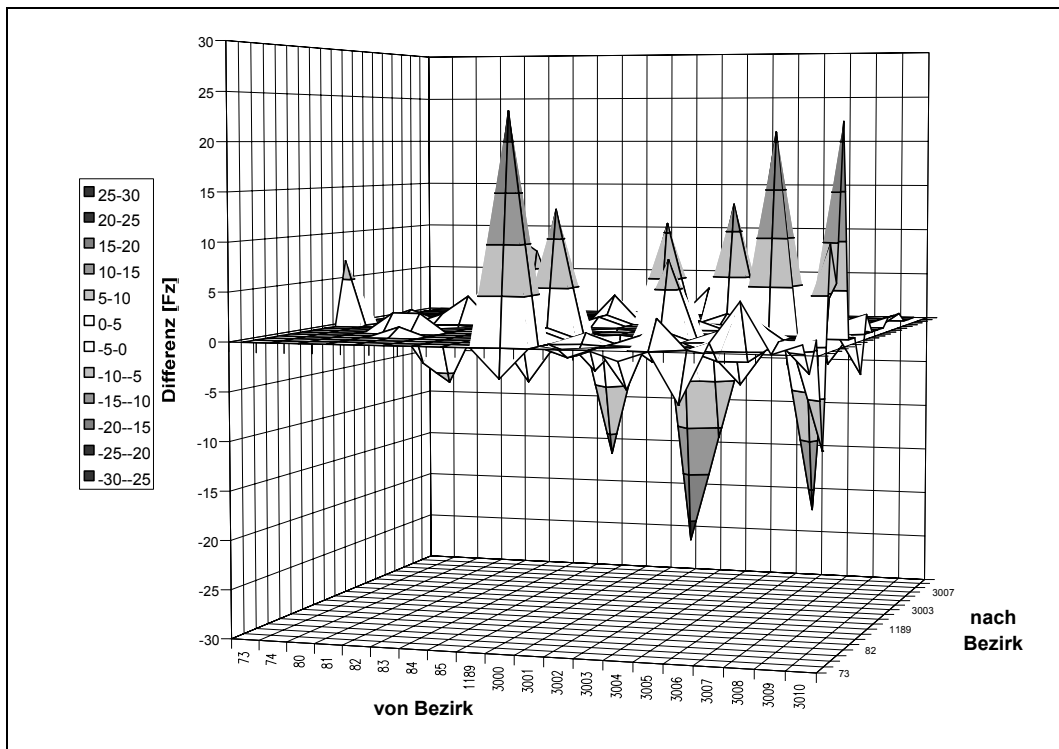


Bild 67: Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (5%) (vormittags) M5(3)

	73	74	80	81	82	83	84	85	1189	3000	3001	3002	3003	3004	3005	3006	3007	3008	3009	3010	3011
73	4	8	0	2	4	1	12	2	0	145	10	65	3	66	29	24	0	27	0	19	0
74	1	3	1	1	3	1	4	1	0	63	26	11	1	50	7	0	9	0	0	50	0
80	1	3	2	1	1	1	4	2	0	36	14	4	0	31	5	0	5	0	0	27	0
81	6	21	5	18	10	8	43	4	0	189	12	48	7	95	2	51	45	1	0	378	0
82	6	19	5	12	20	9	50	3	0	234	12	114	6	203	11	32	55	1	1	199	0
83	1	1	0	0	0	1	3	0	0	6	0	5	0	2	1	1	1	0	0	33	0
84	1	1	1	1	1	1	4	0	0	10	2	14	0	7	0	4	3	0	0	87	0
85	0	0	0	0	0	0	1	0	0	7	0	2	0	12	0	6	1	1	0	9	0
1189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3000	224	675	97	130	91	59	458	28	0	0	2	103	30	154	212	0	3	27	0	91	0
3001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	544	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3002	0	131	22	63	78	48	295	0	0	37	0	0	17	956	0	0	0	0	0	74	0
3003	0	0	0	17	0	0	0	0	0	138	7	44	0	11	0	21	7	2	0	59	0
3004	128	115	32	52	134	42	232	81	1	1372	24	1287	0	0	18	695	89	41	0	0	0
3005	0	118	3	0	0	0	6	0	0	311	0	0	6	0	0	0	0	0	0	88	0
3006	131	1	12	39	27	21	147	62	0	0	0	0	7	265	0	0	0	15	0	14	0
3007	23	195	26	82	103	47	270	25	0	422	0	10	15	0	0	0	0	1	1	40	0
3008	138	21	12	9	6	6	19	14	0	262	0	6	0	82	0	209	0	0	0	53	0
3009	13	43	6	0	15	11	389	5	0	40	21	97	0	12	7	19	44	1	0	0	0
3010	34	431	79	269	258	182	834	18	7	249	162	56	0	0	35	24	25	5	0	0	0
3011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bild 68: Soll-Matrix im Intervall +/- 10% Abweichung (vormittags) M10(1)v [Fz/h]

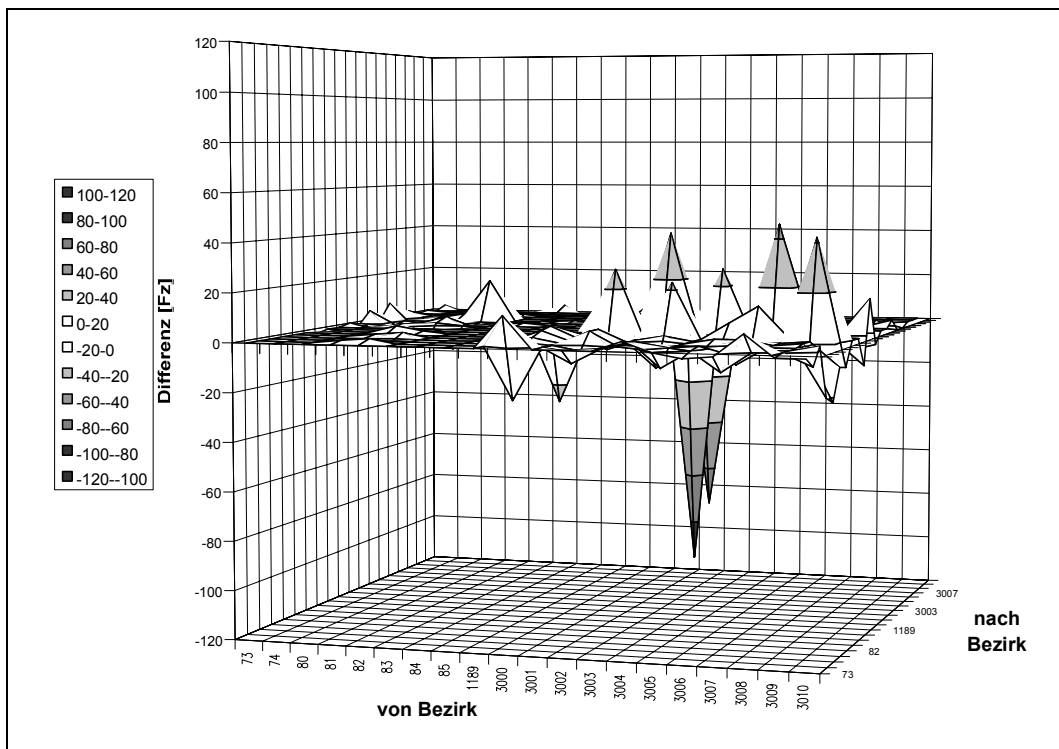


Bild 69: Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (10%) (vormittags) M10(1)

	73	74	80	81	82	83	84	85	1189	3000	3001	3002	3003	3004	3005	3006	3007	3008	3009	3010	3011
73	4	8	0	2	4	1	12	2	0	146	9	64	3	66	30	26	0	28	0	20	0
74	1	3	1	1	3	1	4	1	0	60	25	11	1	47	7	0	9	0	0	52	0
80	1	3	2	1	1	1	4	2	0	36	15	4	0	34	5	0	5	0	0	25	0
81	6	23	5	18	12	8	50	4	0	173	14	48	7	98	2	51	43	1	0	329	0
82	6	22	5	11	23	9	53	3	0	243	11	103	6	212	11	29	50	1	1	193	0
83	1	1	0	0	0	1	3	0	0	6	0	5	0	2	1	1	1	0	0	37	0
84	1	1	1	1	1	1	4	0	0	11	2	14	0	7	0	4	3	0	0	80	0
85	0	0	0	0	0	0	1	0	0	7	0	2	0	10	0	6	1	1	0	9	0
1189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3000	235	596	93	129	90	62	467	27	0	0	2	97	31	146	211	0	3	28	0	106	0
3001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	557	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3002	0	113	22	64	86	40	328	0	0	35	0	0	18	1033	0	0	0	0	0	62	0
3003	0	0	0	16	0	0	0	0	0	158	7	51	0	9	0	22	7	2	0	56	0
3004	125	128	35	55	133	41	244	78	1	1218	25	1095	0	0	19	748	81	40	0	0	0
3005	0	106	3	0	0	0	6	0	0	371	0	0	6	0	0	0	0	0	0	81	0
3006	136	1	13	36	28	19	164	60	0	0	0	0	7	263	0	0	0	17	0	12	0
3007	21	187	26	75	107	49	264	24	0	423	0	10	14	0	0	0	0	1	1	37	0
3008	134	22	12	9	6	6	20	12	0	288	0	6	0	90	0	215	0	0	0	51	0
3009	12	46	6	0	16	12	412	5	0	38	22	86	0	13	7	17	43	1	0	0	0
3010	35	394	80	266	215	190	788	17	7	259	182	54	0	0	39	20	24	5	0	0	0
3011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bild 70: Soll-Matrix im Intervall +/- 10% Abweichung (vormittags) M10(2)v [Fz/h]

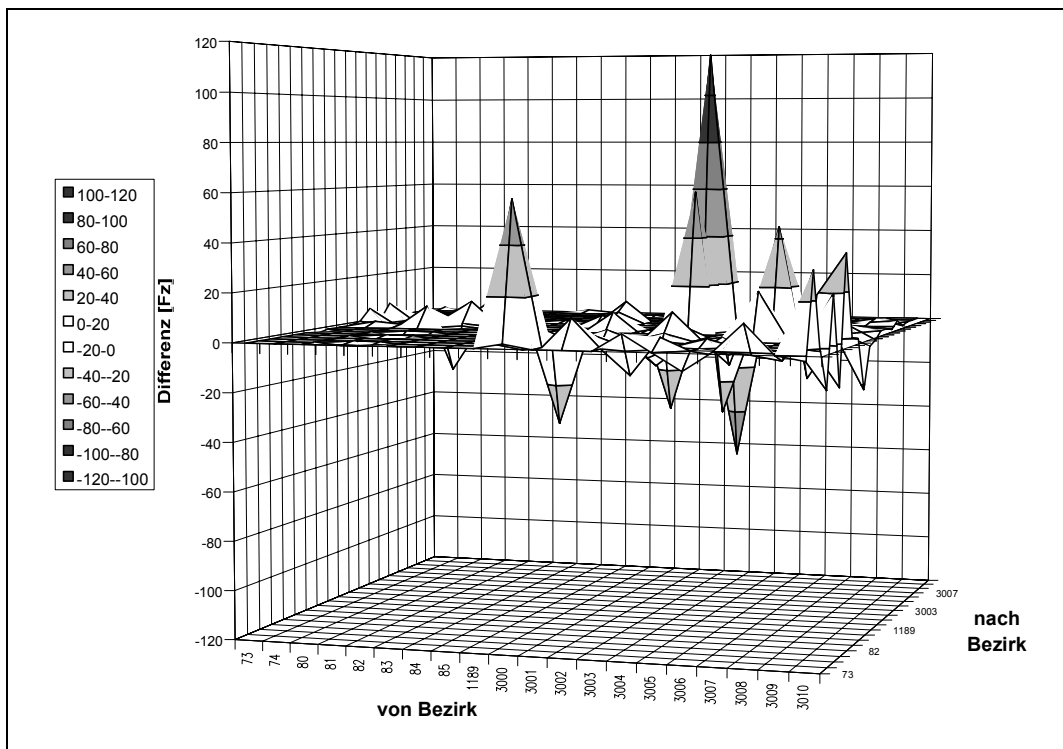


Bild 71: Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (10%) (vormittags) M10(2)

	73	74	80	81	82	83	84	85	1189	3000	3001	3002	3003	3004	3005	3006	3007	3008	3009	3010	3011
73	4	8	0	2	4	1	11	2	0	144	9	75	3	66	29	24	0	28	0	19	0
74	1	3	1	1	3	1	4	1	0	68	24	11	1	49	7	0	9	0	0	52	0
80	1	3	2	1	1	1	4	2	0	40	13	4	0	34	5	0	5	0	0	28	0
81	6	21	5	17	12	8	44	4	0	179	13	50	7	102	2	59	46	1	0	368	0
82	6	22	5	12	24	9	55	3	0	223	13	102	6	206	10	29	54	1	1	196	0
83	1	1	0	0	0	1	3	0	0	6	0	5	0	2	1	1	1	0	0	36	0
84	1	1	1	1	1	1	4	0	0	10	2	14	0	7	0	4	3	0	0	80	0
85	0	0	0	0	0	0	1	0	0	7	0	2	0	12	0	6	1	1	0	9	0
1189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3000	214	653	95	119	95	59	452	28	0	0	2	112	34	161	207	0	3	24	0	99	0
3001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	596	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3002	0	128	18	62	89	41	307	0	0	36	0	0	19	963	0	0	0	0	0	72	0
3003	0	0	0	17	0	0	0	0	0	135	7	46	0	11	0	22	7	2	0	52	0
3004	132	122	33	46	132	40	233	75	1	1263	23	1112	0	0	20	735	90	41	0	0	0
3005	0	120	3	0	0	0	6	0	0	355	0	0	6	0	0	0	0	0	0	83	0
3006	121	1	12	36	30	20	153	62	0	0	0	0	7	281	0	0	0	16	0	13	0
3007	21	190	25	70	97	46	284	21	0	461	0	10	16	0	0	0	0	1	1	35	0
3008	150	21	12	9	6	6	19	13	0	277	0	6	0	78	0	226	0	0	0	54	0
3009	11	41	6	0	16	12	427	5	0	41	23	92	0	12	7	17	48	1	0	0	0
3010	31	420	86	258	256	180	768	19	7	257	172	47	0	0	39	22	24	5	0	0	0
3011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bild 72: Soll-Matrix im Intervall +/- 10% Abweichung (vormittags) M10(3)v [Fz/h]

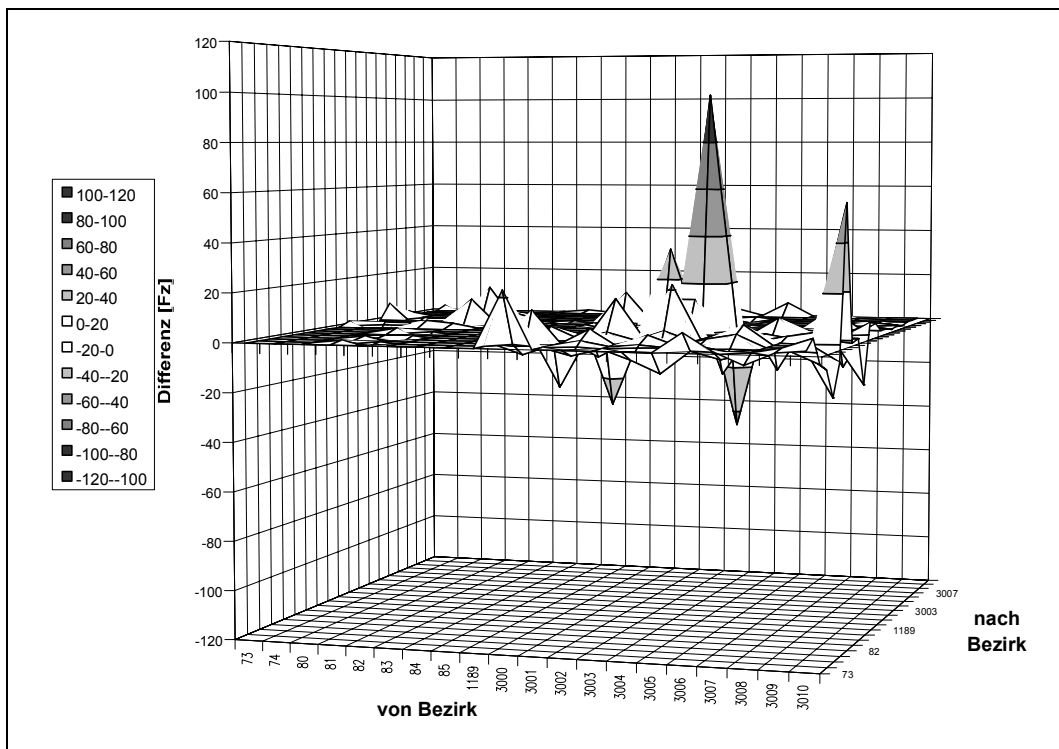


Bild 73: Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (10%) (vormittags) M10(3)

	73	74	80	81	82	83	84	85	1189	3000	3001	3002	3003	3004	3005	3006	3007	3008	3009	3010	3011
73	4	8	0	2	4	1	13	2	0	143	12	62	3	67	23	28	0	28	0	24	0
74	1	3	1	1	3	1	4	1	0	73	26	9	1	37	7	0	10	0	0	49	0
80	1	3	2	1	1	1	4	2	0	42	13	4	0	34	4	0	4	0	0	30	0
81	7	26	5	19	11	7	37	4	0	164	12	58	8	108	2	63	46	1	0	294	0
82	7	23	6	9	22	9	57	3	0	269	12	123	6	232	11	32	44	1	1	185	0
83	1	1	0	0	0	1	3	0	0	6	0	5	0	2	1	1	1	0	0	36	0
84	1	1	1	1	1	0	4	0	0	9	2	18	0	7	0	4	3	0	0	67	0
85	0	0	0	0	0	0	1	0	0	6	0	2	0	10	0	6	1	1	0	9	0
1189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3000	248	778	96	150	92	73	356	25	0	0	2	104	26	154	229	0	3	27	0	95	0
3001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	512	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3002	0	143	22	75	91	48	361	0	0	40	0	0	15	895	0	0	0	0	0	76	0
3003	0	0	0	15	0	0	0	0	0	177	6	44	0	8	0	23	7	2	0	63	0
3004	145	104	39	46	145	39	277	83	1	1498	23	1327	0	0	18	623	70	43	0	0	0
3005	0	94	3	0	0	0	5	0	0	319	0	0	7	0	0	0	0	0	99	0	0
3006	115	1	12	43	28	22	180	63	0	0	0	0	8	308	0	0	0	14	0	15	0
3007	21	220	23	85	111	42	281	24	0	531	0	9	14	0	0	0	0	1	1	36	0
3008	135	18	14	8	7	7	25	11	0	283	0	5	0	69	0	190	0	0	0	52	0
3009	11	48	7	0	18	14	490	6	0	38	22	94	0	12	6	18	53	1	0	0	0
3010	33	342	93	281	209	171	966	16	8	262	203	44	0	0	37	18	20	4	0	0	0
3011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bild 74: Soll-Matrix im Intervall +/- 20% Abweichung (vormittags) M20(1) [Fz/h]

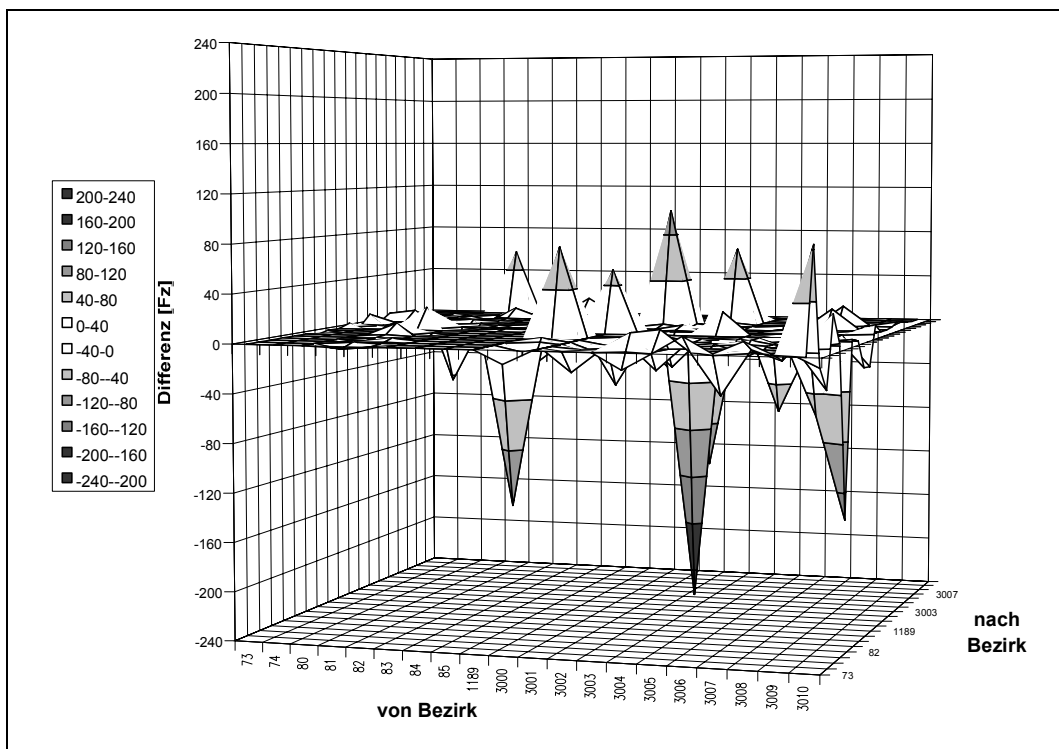


Bild 75: Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (20%) (vormittags) M20(1)

	73	74	80	81	82	83	84	85	1189	3000	3001	3002	3003	3004	3005	3006	3007	3008	3009	3010	3011
73	4	7	0	2	4	1	11	2	0	146	8	58	3	70	28	24	0	30	0	22	0
74	1	3	1	1	3	1	4	1	0	61	30	10	1	39	7	0	10	0	0	49	0
80	1	3	2	1	1	1	4	2	0	38	13	4	0	30	6	0	6	0	0	26	0
81	7	20	5	18	11	9	44	4	0	189	15	56	6	107	2	47	43	1	0	303	0
82	7	19	6	10	22	8	44	3	0	239	11	96	7	206	9	30	61	1	1	196	0
83	1	1	0	0	0	1	3	0	0	5	0	6	0	2	1	1	1	0	0	29	0
84	1	1	1	1	1	0	4	0	0	12	2	12	0	6	0	4	3	0	0	66	0
85	0	0	0	0	0	0	1	0	0	6	0	2	0	11	0	7	1	1	0	10	0
1189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3000	209	658	87	112	94	73	386	33	0	0	2	101	31	124	200	0	3	21	0	81	0
3001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	619	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3002	0	100	24	58	72	49	357	0	0	31	0	0	16	958	0	0	0	0	0	69	0
3003	0	0	0	18	0	0	0	0	0	159	6	56	0	11	0	24	8	2	0	47	0
3004	108	100	28	57	133	38	289	81	1	1299	23	1193	0	0	16	628	70	35	0	0	0
3005	0	130	3	0	0	0	6	0	0	398	0	0	5	0	0	0	0	0	0	75	0
3006	105	1	13	41	27	23	178	68	0	0	0	0	8	242	0	0	0	19	0	12	0
3007	19	210	28	77	117	37	303	19	0	393	0	9	12	0	0	0	0	1	1	37	0
3008	119	20	14	10	6	5	19	13	0	282	0	7	0	93	0	220	0	0	0	53	0
3009	12	36	5	0	15	14	434	6	0	44	20	72	0	14	8	16	53	1	0	0	0
3010	39	493	87	208	207	154	666	17	8	221	212	52	0	0	40	23	20	4	0	0	0
3011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bild 76: Soll-Matrix im Intervall +/- 20% Abweichung (vormittags) M20(2) [Fz/h]

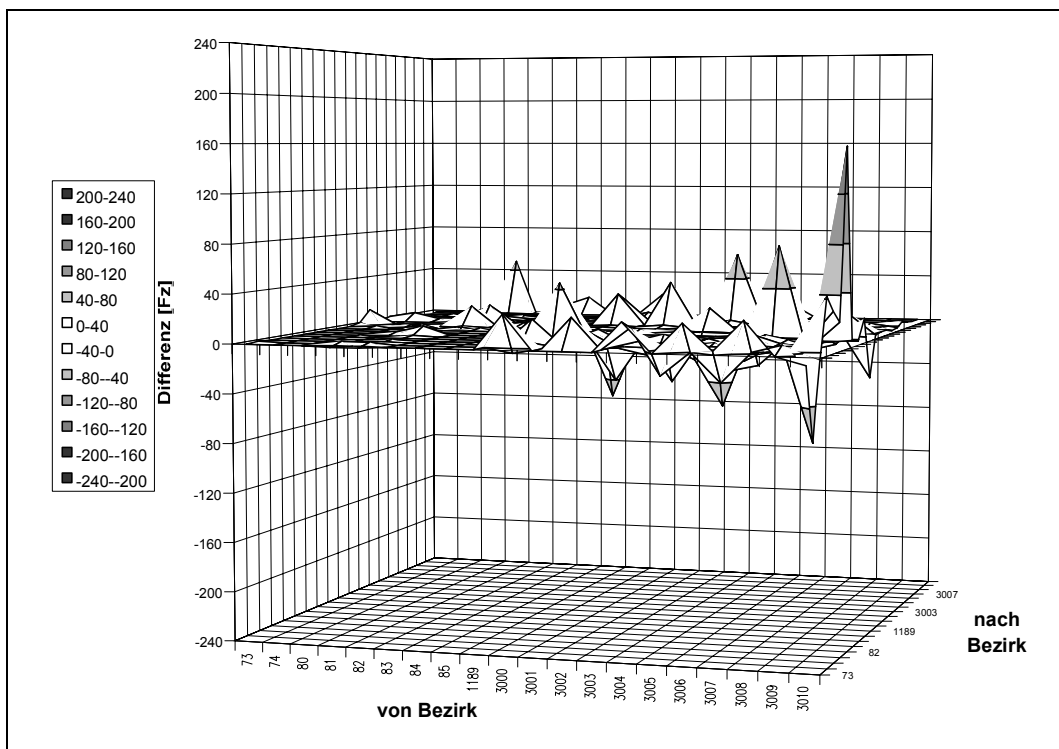


Bild 77: Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (20%) (vormittags) M20(2)

	73	74	80	81	82	83	84	85	1189	3000	3001	3002	3003	3004	3005	3006	3007	3008	3009	3010	3011
73	4	9	0	2	4	1	13	2	0	133	8	70	3	63	30	22	0	25	0	25	0
74	1	3	1	1	3	1	4	1	0	61	27	10	1	45	7	0	9	0	0	44	0
80	1	3	2	1	1	1	4	2	0	44	13	4	0	35	6	0	5	0	0	25	0
81	5	25	6	15	12	8	48	4	0	206	12	55	8	107	2	54	39	1	0	296	0
82	5	19	4	12	21	8	42	3	0	181	10	135	7	227	11	36	44	1	1	183	0
83	1	1	0	0	0	1	3	0	0	7	0	5	0	2	1	1	1	0	0	30	0
84	1	1	1	1	1	0	4	0	0	10	2	14	0	6	0	4	3	0	0	70	0
85	0	0	0	0	0	0	1	0	0	7	0	2	0	9	0	7	1	1	0	8	0
1189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3000	257	754	94	153	83	64	467	30	0	0	2	120	37	164	262	0	3	21	0	98	0
3001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	554	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3002	0	116	16	66	76	46	302	0	0	34	0	0	19	1147	0	0	0	0	0	64	0
3003	0	0	0	18	0	0	0	0	0	132	7	48	0	8	0	25	6	2	0	56	0
3004	116	110	36	40	102	45	298	82	1	1278	23	1029	0	0	21	680	72	37	0	0	0
3005	0	108	3	0	0	0	5	0	0	326	0	0	6	0	0	0	0	0	0	102	0
3006	140	1	12	42	30	18	126	69	0	0	0	0	6	257	0	0	0	18	0	13	0
3007	22	163	20	67	86	42	265	19	0	553	0	13	13	0	0	0	0	1	1	30	0
3008	153	21	12	9	7	6	19	15	0	319	0	6	0	93	0	170	0	0	0	51	0
3009	10	44	7	0	17	10	453	6	0	42	22	101	0	14	7	20	40	1	0	0	0
3010	32	422	95	252	198	196	914	20	6	253	176	59	0	0	35	18	26	5	0	0	0
3011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bild 78: Soll-Matrix im Intervall +/- 20% Abweichung (vormittags) M20(3) [Fz/h]

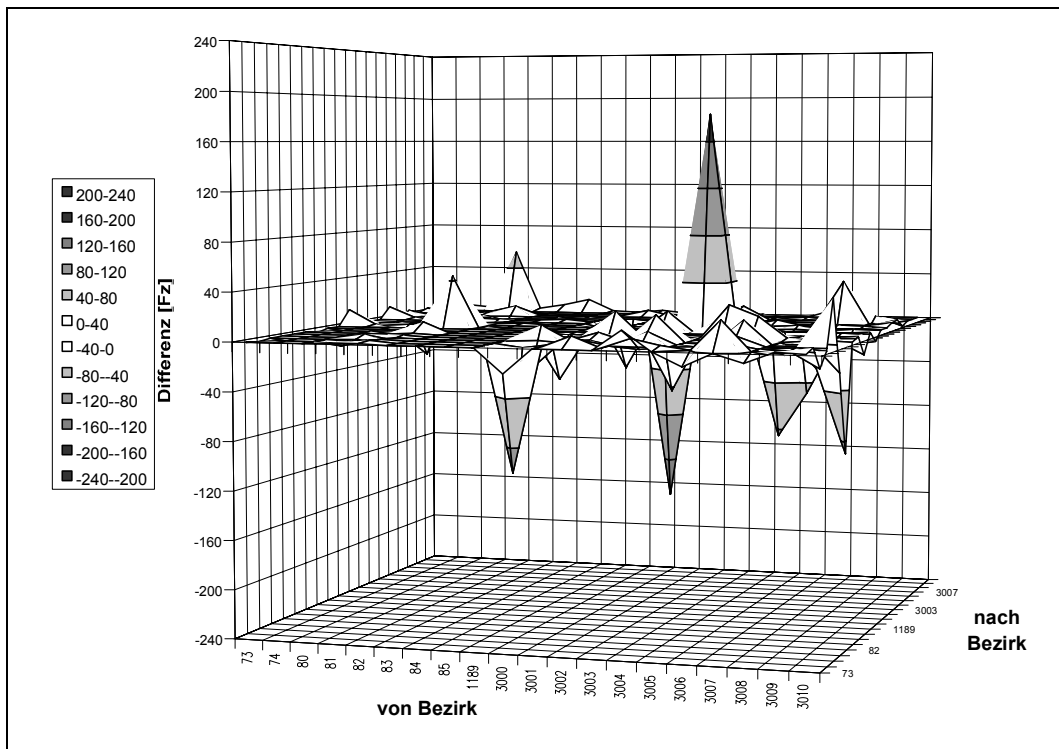


Bild 79: Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (20%) (vormittags) M20(3)

	73	74	80	81	82	83	84	85	1189	3000	3001	3002	3003	3004	3005	3006	3007	3008	3009	3010	3011
73	6	2	0	6	7	0	0	2	0	154	0	99	0	80	43	34	3	82	8	19	5
74	4	3	3	15	14	0	1	0	0	264	88	9	0	212	16	0	97	6	22	244	22
80	2	3	4	5	6	0	1	1	0	51	16	2	0	68	5	0	32	2	3	47	1
81	3	2	5	57	22	4	4	4	0	52	9	97	11	75	4	18	88	5	0	247	16
82	4	4	5	21	56	2	4	4	0	67	28	94	0	209	7	22	123	6	11	122	7
83	1	1	1	5	6	1	1	0	0	12	7	25	0	19	0	9	26	1	8	150	3
84	7	3	3	31	34	3	4	1	0	51	18	176	0	202	0	42	122	9	329	740	9
85	2	0	1	5	6	0	0	0	0	24	1	3	0	59	0	42	9	11	3	30	3
1189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
3000	166	76	44	173	214	14	18	17	0	0	4	104	88	965	303	0	367	271	34	346	5
3001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	205	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3002	4	16	5	77	91	8	19	0	0	100	0	0	76	887	0	0	3	0	72	67	16
3003	1	0	0	2	0	1	0	0	0	5	17	43	0	0	0	2	0	1	0	0	0
3004	86	9	8	44	97	0	0	23	1	289	16	820	0	0	9	442	93	62	0	0	0
3005	0	8	3	0	0	0	0	0	0	69	0	0	4	0	0	0	0	0	0	27	0
3006	69	0	4	61	61	6	9	29	0	0	0	0	5	216	0	0	0	201	29	22	92
3007	14	15	10	54	68	4	14	9	0	272	2	46	0	0	0	0	0	6	28	5	0
3008	38	2	4	9	2	0	0	8	0	63	0	0	0	52	0	91	0	0	1	3	0
3009	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0	0	0
3010	16	57	66	276	215	35	80	3	0	241	126	29	2	0	43	0	25	14	0	0	0
3011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bild 80: Soll-Matrix im Intervall +/- 10% Abweichung (nachmittags) M10(1)n [Fz/h]

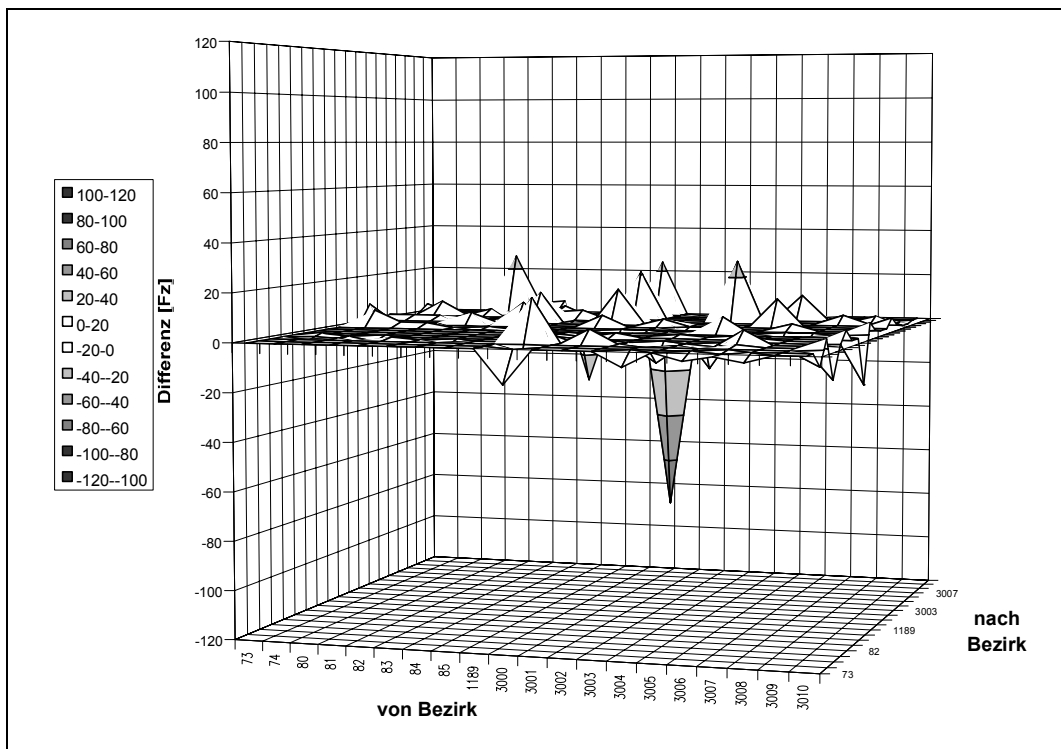


Bild 81: Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (10%) (nachmittags) M10(1)n

	73	74	80	81	82	83	84	85	1189	3000	3001	3002	3003	3004	3005	3006	3007	3008	3009	3010	3011
73	6	2	0	6	7	0	0	2	0	146	0	107	0	77	43	32	3	92	8	20	5
74	4	3	3	15	15	0	1	0	0	281	86	9	0	220	16	0	93	6	21	219	19
80	2	3	4	5	6	0	1	1	0	58	16	2	0	63	5	0	35	2	3	45	1
81	3	2	5	60	22	4	4	4	0	58	11	95	10	74	4	19	92	5	0	297	14
82	4	4	5	23	60	2	4	4	0	71	26	105	0	189	7	23	130	6	11	130	7
83	1	1	1	5	6	1	1	0	0	10	7	25	0	17	0	9	27	1	8	144	3
84	7	3	3	31	33	3	4	1	0	47	18	190	0	226	0	44	139	9	290	679	9
85	2	0	1	5	6	0	0	0	0	23	1	3	0	59	0	46	9	13	3	34	3
1189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
3000	146	80	42	176	210	14	18	18	0	0	4	104	83	967	291	0	394	253	31	348	5
3001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3002	4	16	5	80	87	8	22	0	0	102	0	0	74	742	0	0	3	0	69	63	17
3003	1	0	0	2	0	1	0	0	0	5	18	40	0	0	0	2	0	1	0	0	0
3004	74	9	8	43	90	0	0	23	1	287	17	728	0	0	9	445	85	60	0	0	0
3005	0	8	3	0	0	0	0	0	0	73	0	0	4	0	0	0	0	0	0	31	0
3006	70	0	4	54	56	6	9	27	0	0	0	5	233	0	0	0	0	193	30	21	87
3007	12	13	9	50	80	4	14	9	0	255	2	53	0	0	0	0	0	6	29	5	0
3008	35	2	4	9	2	0	0	8	0	54	0	0	0	48	0	92	0	0	1	3	0
3009	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	32	0	0	0	0
3010	16	60	60	269	216	31	85	3	0	214	142	31	2	0	46	0	22	13	0	0	0
3011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bild 82: Soll-Matrix im Intervall +/- 10% Abweichung (nachmittags) M10(2)n [Fz/h]

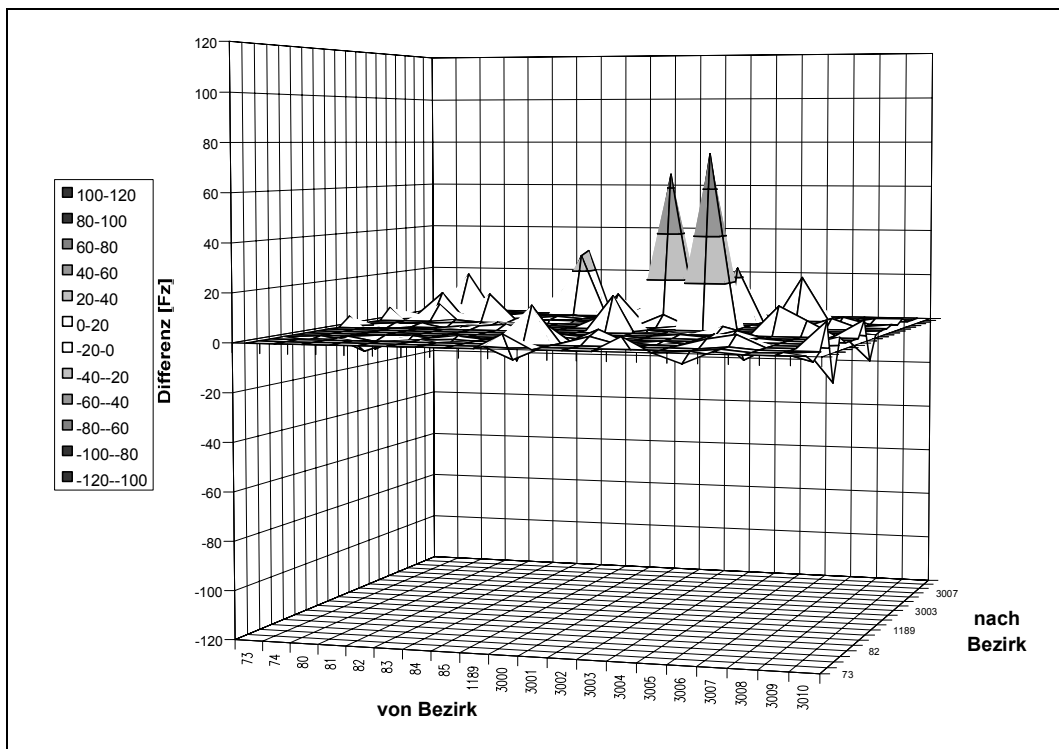


Bild 83: Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (10%) (nachmittags) M10(2)n

	73	74	80	81	82	83	84	85	1189	3000	3001	3002	3003	3004	3005	3006	3007	3008	3009	3010	3011
73	6	2	0	6	7	0	0	2	0	158	0	108	0	87	41	32	3	94	8	18	5
74	4	3	3	15	16	0	1	0	0	265	81	9	0	233	18	0	93	6	23	219	22
80	2	3	4	5	6	0	1	1	0	57	15	2	0	69	5	0	29	2	3	49	1
81	3	2	5	59	18	4	4	4	0	50	11	95	12	77	4	19	92	5	0	254	16
82	4	4	5	22	54	2	4	4	0	72	25	93	0	197	7	20	118	6	12	114	7
83	1	1	1	5	6	1	1	0	0	11	7	25	0	18	0	9	27	1	8	142	3
84	7	3	3	29	35	3	4	1	0	53	16	168	0	227	0	43	132	9	323	689	11
85	2	0	1	5	6	0	0	0	0	23	1	3	0	61	0	44	9	11	3	31	3
1189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
3000	150	79	45	192	232	16	20	19	0	0	4	112	89	1038	262	0	357	260	31	396	5
3001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	184	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3002	4	17	5	77	85	8	23	0	0	92	0	0	75	849	0	0	3	0	71	60	17
3003	1	0	0	2	0	1	0	0	0	5	16	42	0	0	0	2	0	1	0	0	0
3004	74	9	8	41	84	0	0	22	1	291	16	767	0	0	9	441	82	56	0	0	0
3005	0	8	3	0	0	0	0	0	0	76	0	0	4	0	0	0	0	0	0	29	0
3006	71	0	4	62	54	6	9	32	0	0	0	0	5	228	0	0	0	195	30	21	84
3007	12	14	10	59	81	4	15	9	0	266	2	48	0	0	0	0	0	6	30	5	0
3008	32	2	4	9	2	0	0	8	0	56	0	0	0	53	0	99	0	0	1	3	0
3009	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0
3010	16	55	56	256	207	34	86	3	0	207	132	33	2	0	46	0	24	12	0	0	0
3011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bild 84: Soll-Matrix im Intervall +/- 10% Abweichung (nachmittags) M10(3)n [Fz/h]

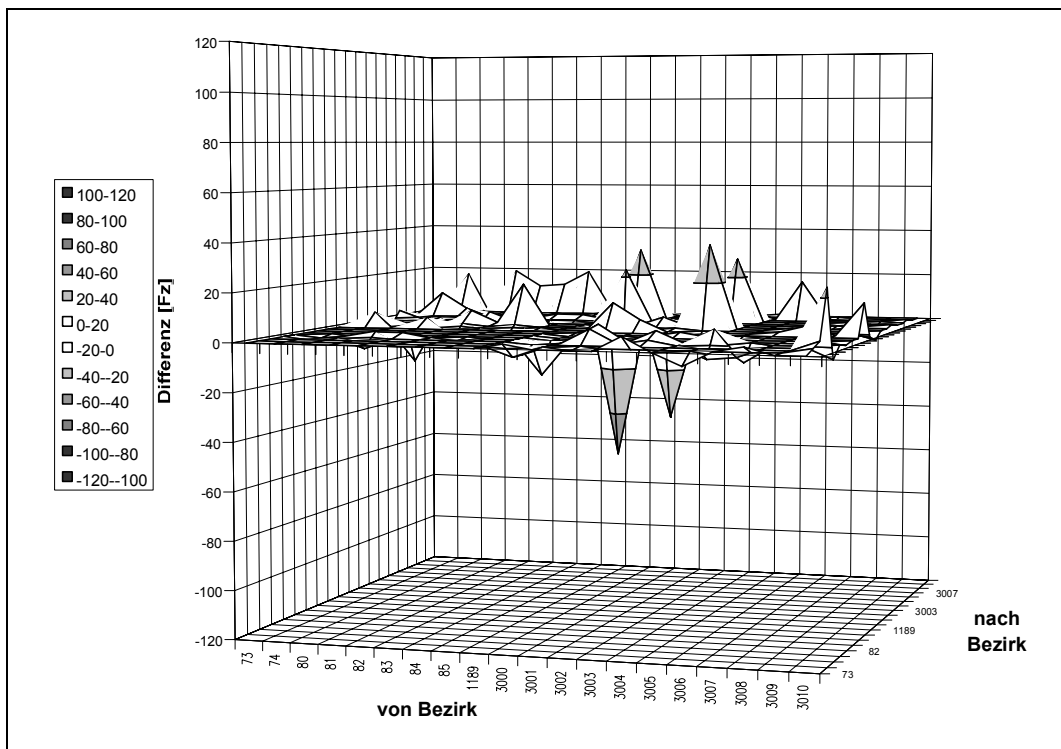


Bild 85: Differenz zwischen Grundmatrix und Soll-Matrix (10%) (nachmittags) M10(3)n

Anlage 3: Nomenklatur der Bewertungsergebnisse

Zur Optimierung der Auswertung wurde die in **Bild 86** und **Bild 87** erläuterte systematische Kennzeichnung der Detektorsätze und Bewertungsergebnisse der einzelnen Versuchsläufe verwendet. Die Ergebnistabellen der ACCESS-Datenbank, die während der Untersuchung aufgebaut wurde, sowie die Ergebnisdiagramme in **Kapitel 6** basieren auf dieser Schreibweise. In **Anlage 9** sind die Abkürzungen dargestellt.

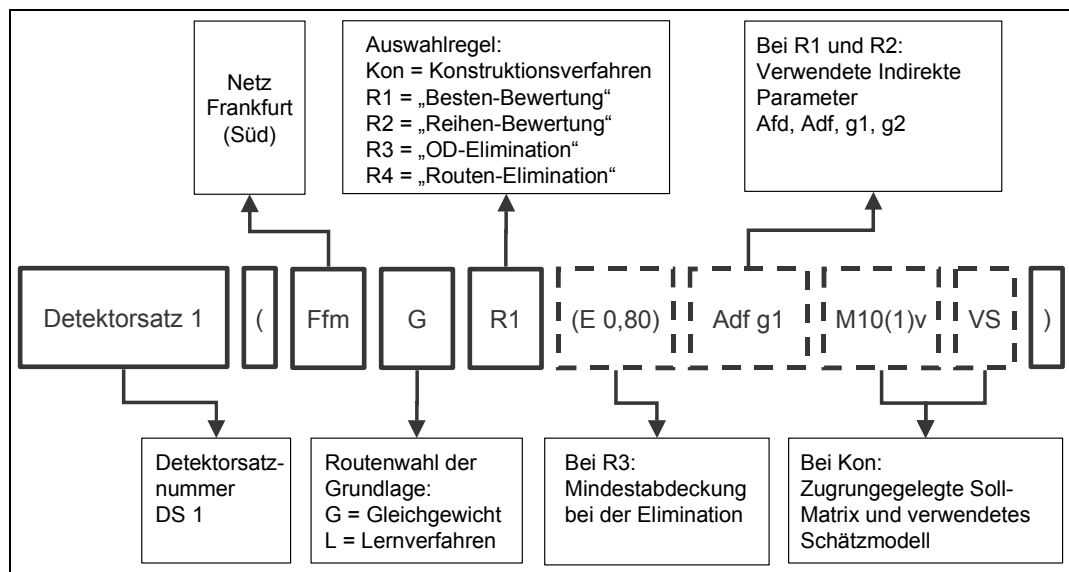


Bild 86: Systematische Kennzeichnung der Detektorsätze

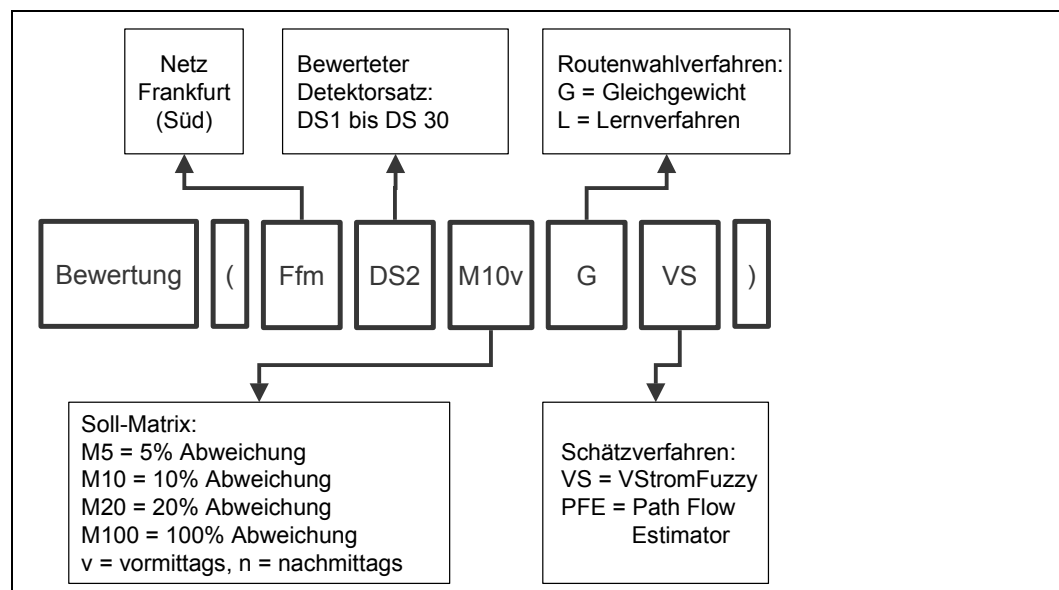


Bild 87: Systematische Kennzeichnung der Bewertungsergebnisse

Anlage 5: Funktionsweise des entwickelten Programms ODeFIX



Bild 88: ODeFIX - Begrüßungsbildschirm

ODeFIX ist ein Programm zur vergleichenden Bewertung von Auswahlregeln für Detektoren zur Quelle-Ziel-Matrix-Anpassung. Das Bewertungskriterium ist die mit den entsprechend ausgewählten Detektoren erzielte Qualität der geschätzten Matrix. Zur Zeit existiert eine Schnittstelle zu dem makroskopischen Verkehrsprogramm VISUM (PTV AG). Alle erforderlichen Grundlagendaten können aus dem in VISUM kodierten Netz ausgelesen und aus anderen Datenquellen in das erforderliche Datenformat gebracht werden. Weiterhin existiert eine Schnittstelle zu dem Datenbankprogramm Microsoft ACCESS, in dem sämtliche Daten aufbereitet werden. ODeFIX ist in der Lage, alle in VISUM kodierten und geeichten Netze zu verarbeiten.

Zur Bewertung der definierten Detektorsätze ist der Einsatz von Quelle-Ziel-Matrix-Anpassungsverfahren erforderlich. In VISUM 7.0 ist eine Version von VStromFuzzy und in VISUMonline 0.42 ist eine Version des

Path Flow Estimators integriert. Zu beiden Schätzverfahren besteht eine Schnittstelle.

Bild 89 zeigt die Eingabemaske in ODeFIX. Zunächst wird die historische bzw. planerische Grundlage geladen. Danach werden die neuen Zählwerte eingelesen. Beide Grundlagen müssen in Form einer VISUM-Versionsdatei vorliegen, bei der die jeweiligen Matrizen auf das Netzmodell umgelegt wurden.

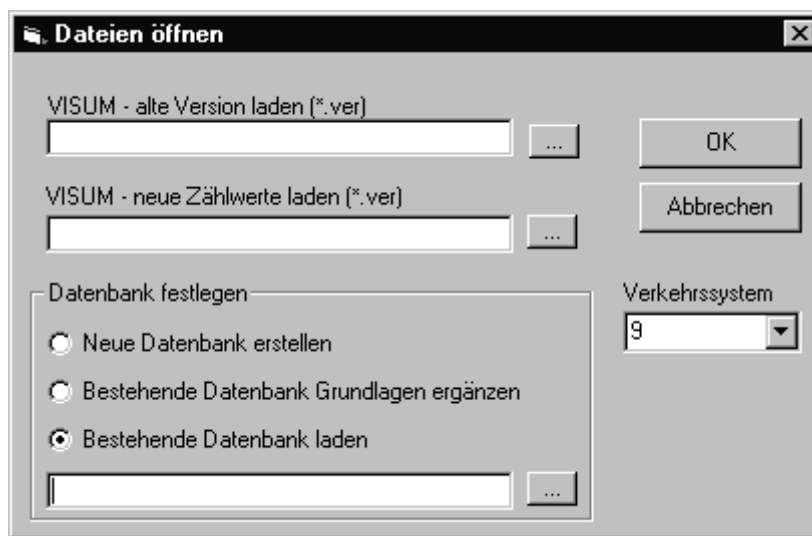


Bild 89: ODeFIX – Eingabemaske Netzmodell und Umlegungsergebnisse

Zu Beginn kann eine neue Datenbank erstellt werden. ODeFIX liest alle erforderlichen Grundlagen aus den VISUM-Dateien aus. Im weiteren Verlauf der Bearbeitung kann diese Datenbank ergänzt werden, beispielsweise, wenn eine neue Soll-Matrix definiert wurde. Sollen mit der bestehenden Datenbank Auswahlverfahren getestet werden, kann diese als dritte Möglichkeit einfach geladen werden.

ODeFIX setzt die Koordinaten der Kanten aus VISUM in einem einfachen Netzmodell um, das die Oberfläche für weitere Berechnungen darstellt.

Die Umsetzung der Informationen im Netzmodell dient der Orientierung. Die in Vektorform verarbeiteten Daten lassen sich so nur schwer auf

Plausibilität prüfen. Deshalb wurde beispielsweise eine Detektorsuchfunktion eingerichtet (**Bild 90**).

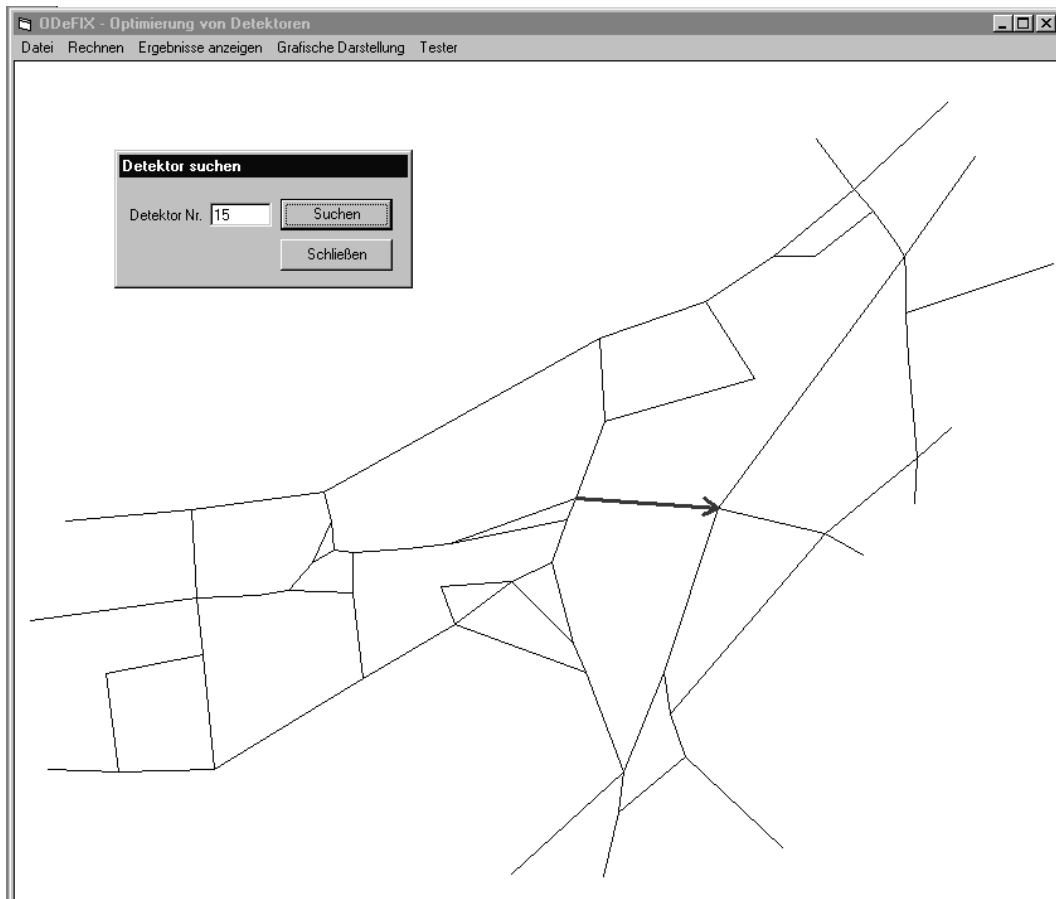


Bild 90: ODeFIX – Detektorsuchfunktion

In **Bild 91** ist die Eingabe zur Festlegung der zu testenden Auswahlverfahren und Randbedingungen dargestellt. Hier kann das jeweilige Auswahlverfahren, das eingesetzte Schätzverfahren, die Gewichtungparameter und der der Bewertung zugrundegelegte Abweichungsparameter angeklickt werden. Die so eingestellte Konfiguration kann dann gestartet werden. ODeFIX ruft alle erforderlichen Programme automatisch auf und führt die Auswahl und Bewertung durch.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, verschiedene Konfigurationen in einem Versuchsplan abzuspeichern, der dann im Gesamten abgearbeitet wird. So können eine Vielzahl von Berechnungen ohne Eingriff des Nutzers beispielsweise über Nacht durchgeführt werden.

Bild 91: ODeFIX - Eingabemaske für eingesetzte Verfahren

Nach der Durchführung der Berechnung können die Ergebnisse in ACCESS in den Ausgabetafeln direkt interpretiert werden. ODeFIX verfügt jedoch über zwei Auswertungsmodule.

In **Bild 81** ist die Auswahlmaske für die Darstellung des Abweichungsverlaufs bei zunehmender Anzahl an Detektoren dargestellt. Hier können

die gewünschten Bewertungsergebnisse ausgewählt werden. **Bild 93** zeigt ein Beispiel eines Abweichungsverlauf im Vergleich unterschiedlich eingesetzter Auswahlverfahren.



Bild 92: ODeFIX – Ergebnisausgabe: Abweichungsverlauf (Auswahl)

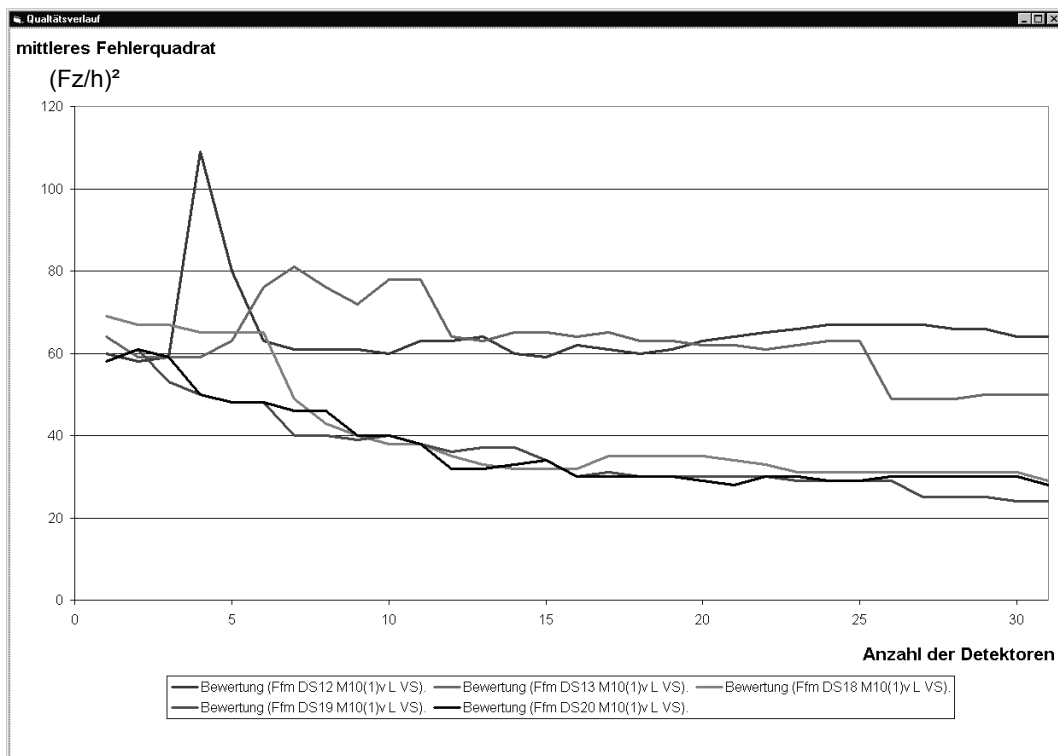


Bild 93: ODeFIX – Ergebnisausgabe: Abweichungsverlauf (Grafik)

Die zweite Auswertungsmöglichkeit in ODeFIX ist die Darstellung des ausgewählten Detektorsatzes. Dieser kann einzeln oder im Vergleich mit einem anderen Satz im Netzmodell dargestellt werden (**Bild 94**, **Bild 95**).

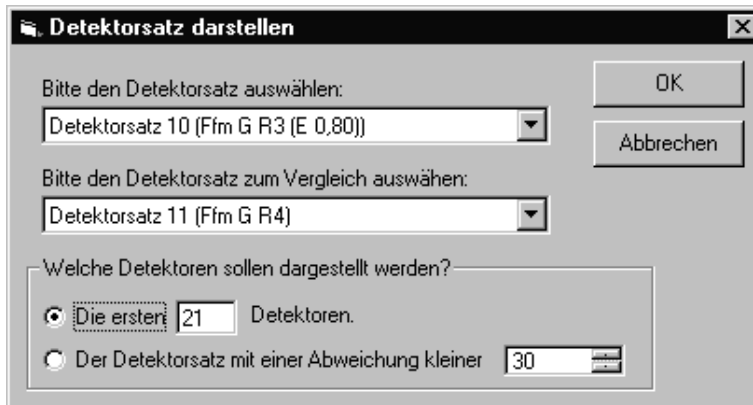


Bild 94: ODeFIX – Ergebnisausgabe: Detektorstandorte (Auswahl)

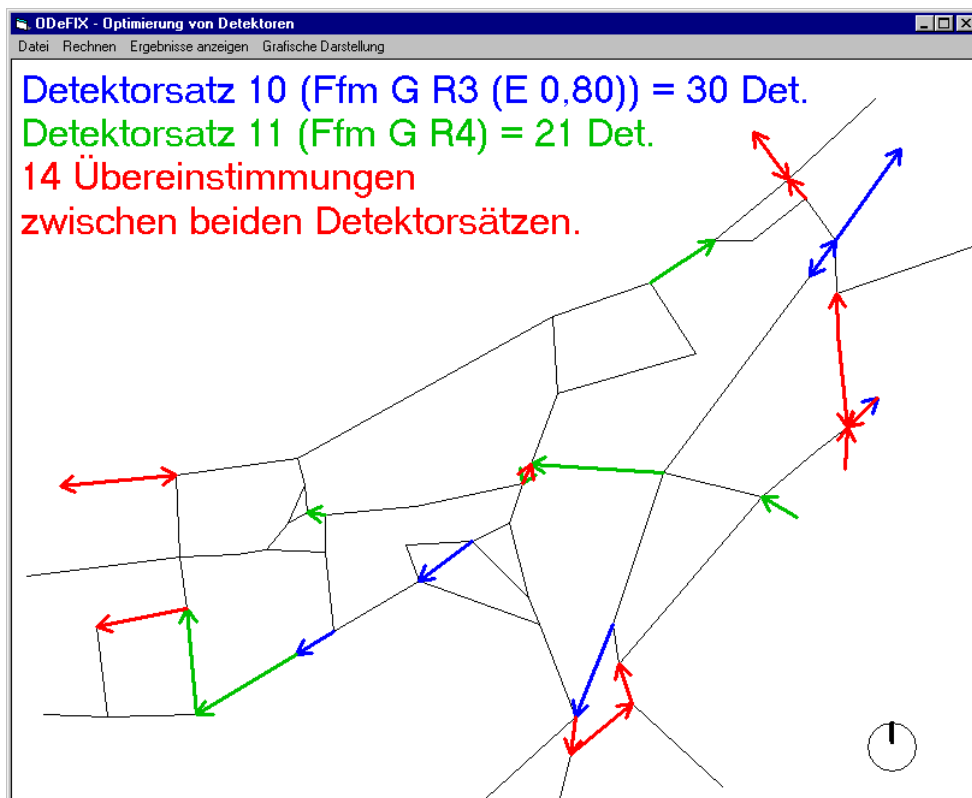
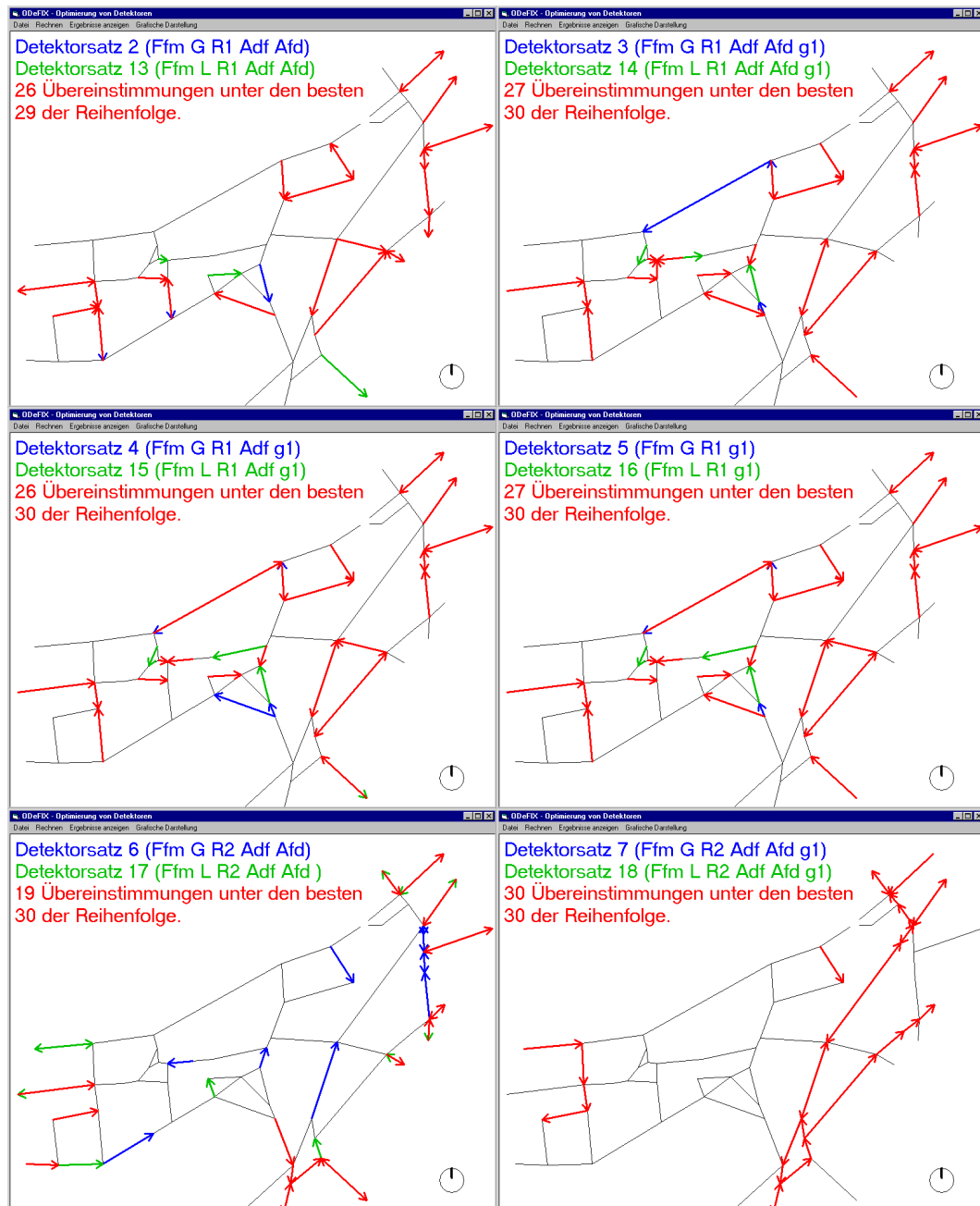


Bild 95: ODeFIX – Ergebnisausgabe: Detektorstandorte (Grafik)

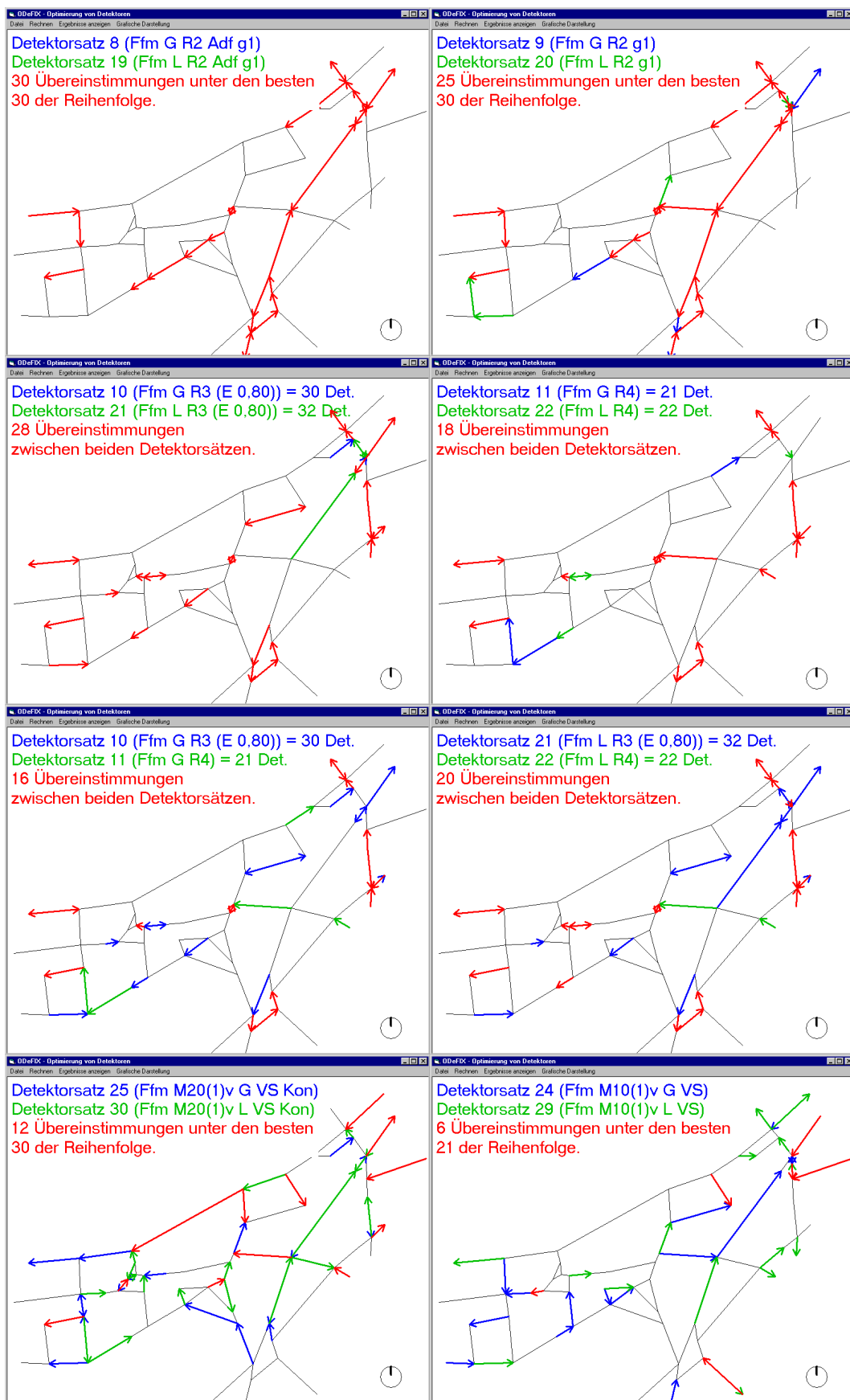
Anlage 6: Vergleich der Standorte der definierten Detektorsätze



Legende:

Detektorstandort = Kante zwischen zwei Knoten im strategischen Netz mit Richtungsangabe.

- Nur eine Richtung erfassen.
- ↔ Beide Richtungen erfassen.



Anlage 7: Vergleich des Qualitätsverlaufs der definierten Detektorsätze

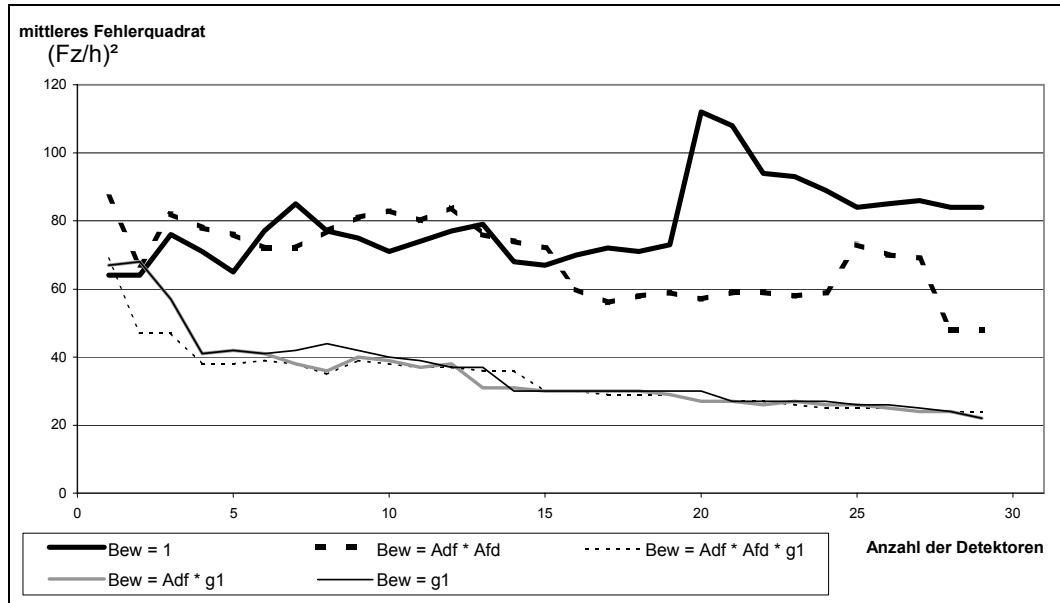


Bild 96: Vergleich der Parameter der "Besten-Bewertung" mit der Matrix M10(1)v bei Gleichgewichtsumlegung der Grundmatrix

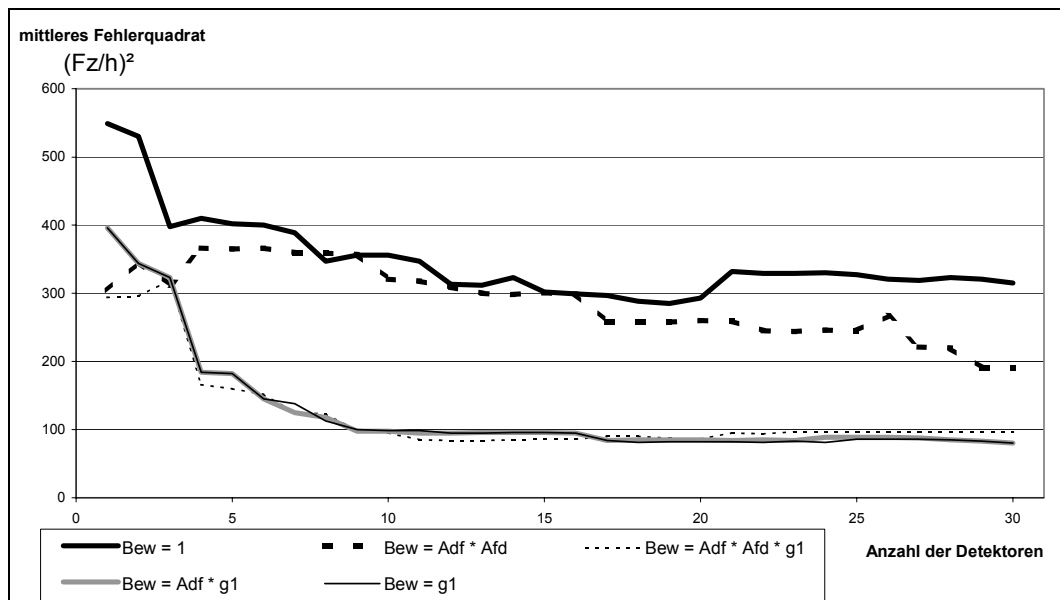


Bild 97: Vergleich der Parameter der "Besten-Bewertung" mit der Matrix M20(1)v bei Gleichgewichtsumlegung der Grundmatrix

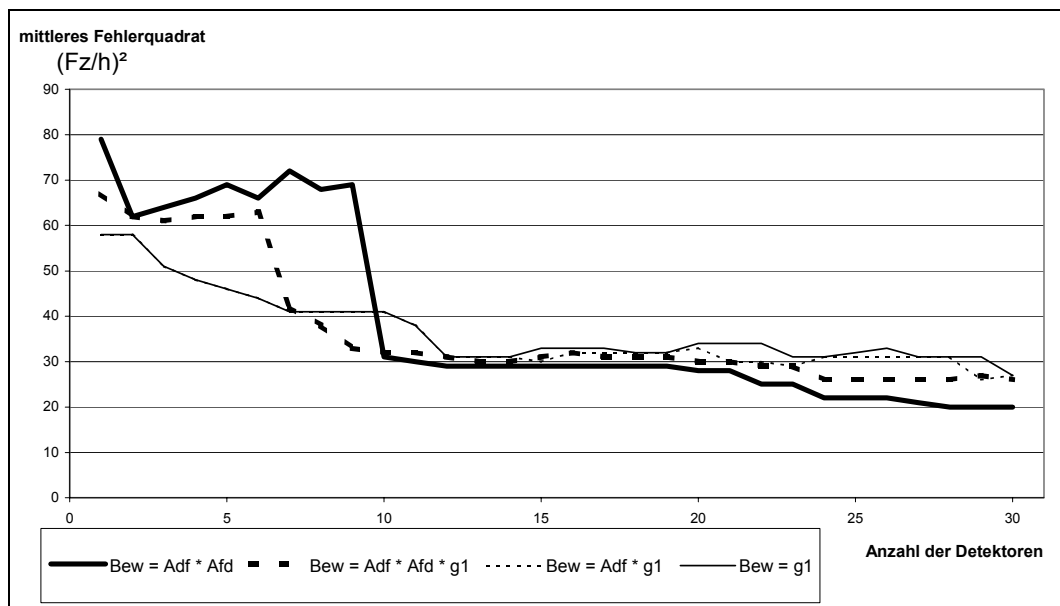


Bild 98: Vergleich der Parameter der „Reihen-Bewertung“ mit der Matrix M10(1)v bei Gleichgewichtsumlegung der Grundmatrix

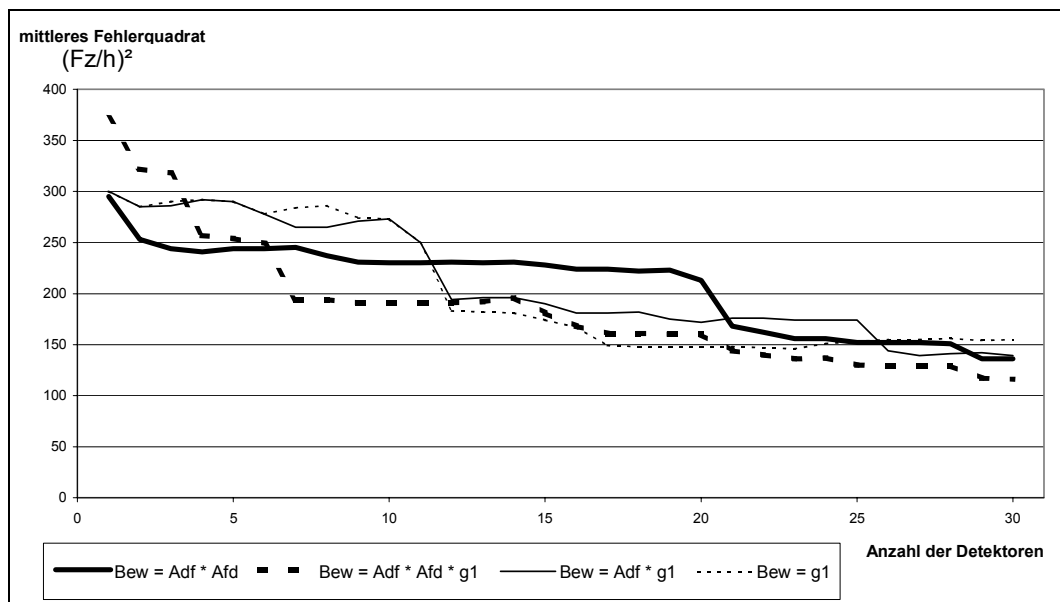


Bild 99: Vergleich der Parameter der „Reihen-Bewertung“ mit der Matrix M20(1)v bei Lernverfahrenumlegung der Grundmatrix

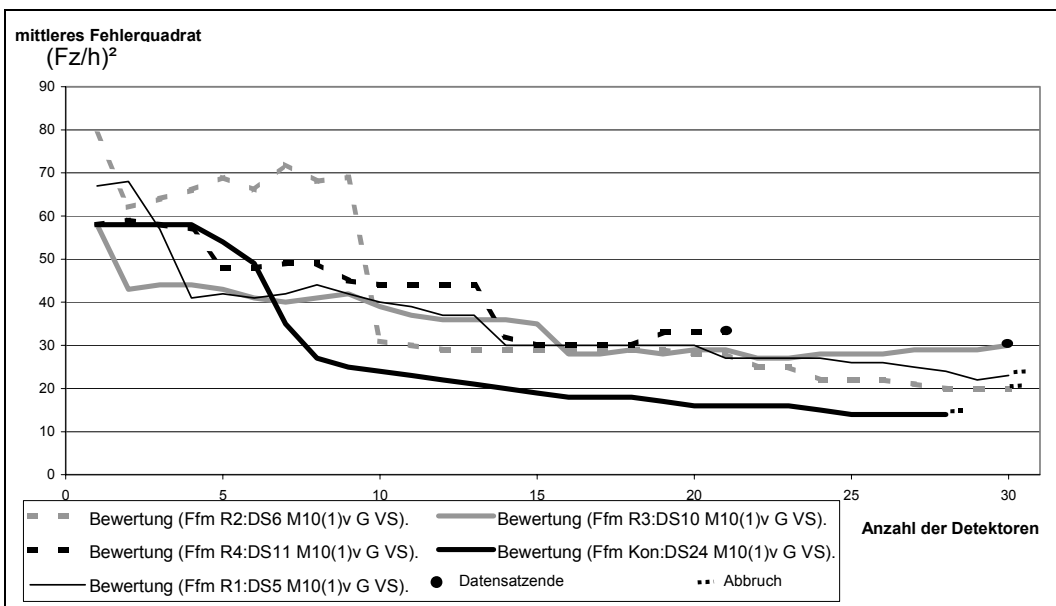


Bild 100: Vergleich der Auswahlregeln bei M10(1)v G VS

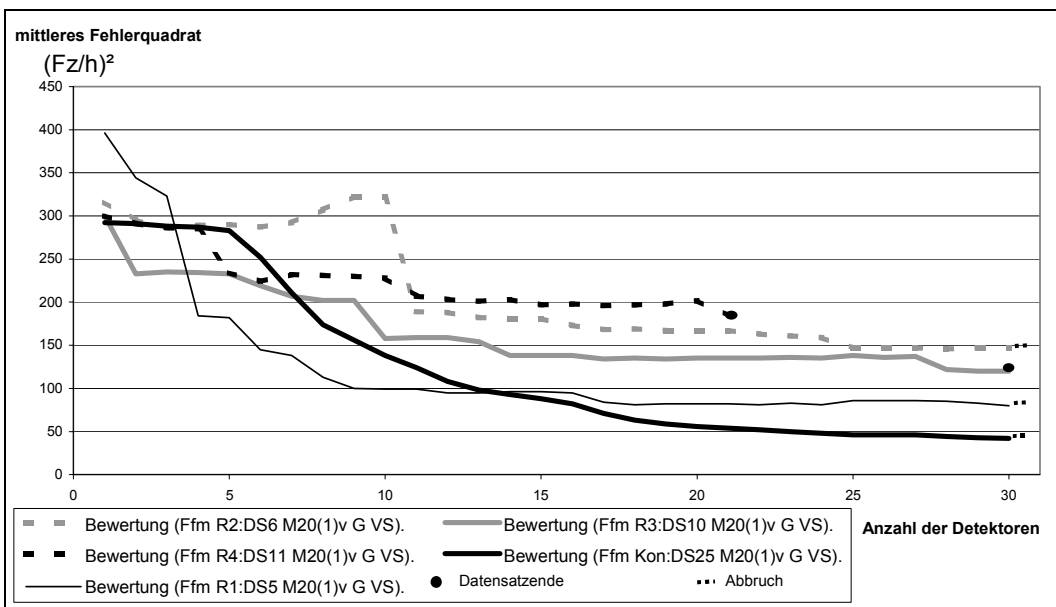


Bild 101: Vergleich der Auswahlregeln bei M20(1)v G VS

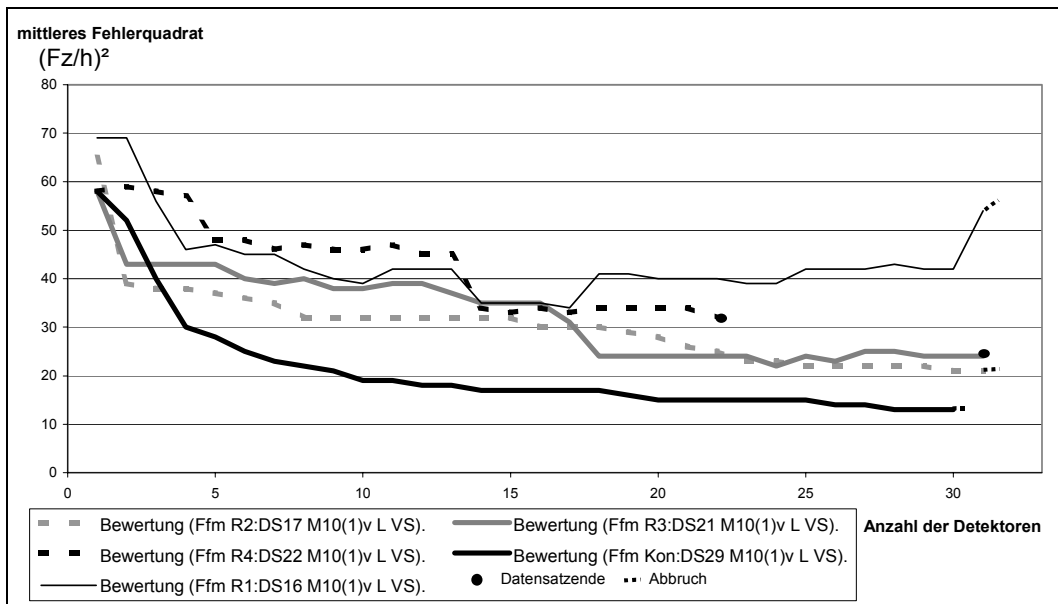


Bild 102: Vergleich der Auswahlregeln bei M10(1)v L VS

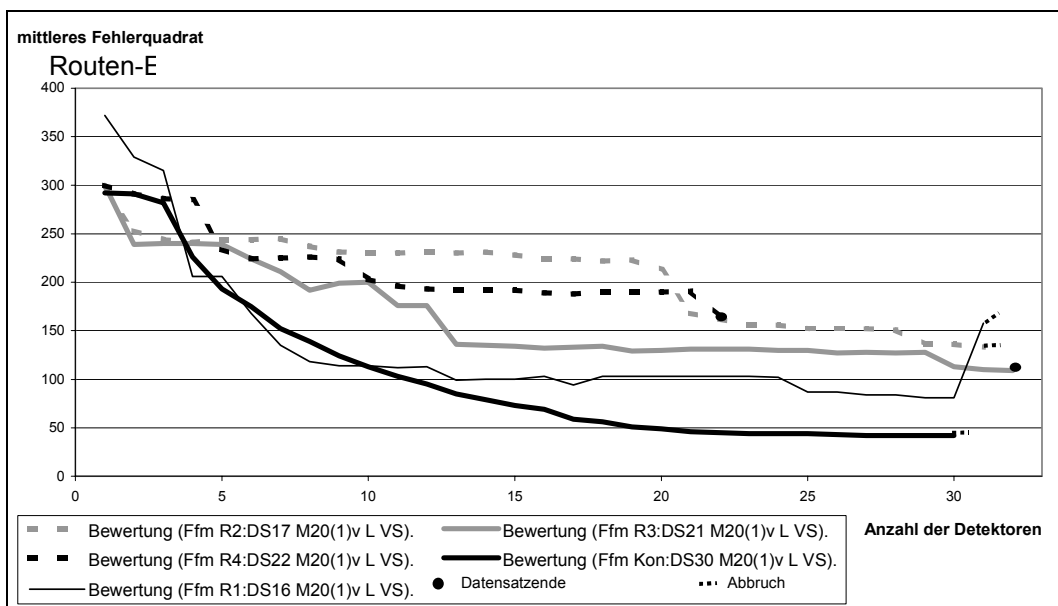


Bild 103: Vergleich der Auswahlregeln bei M20(1)v L VS

Anlage 8: Ergebnisse der Evaluation des optimalen Detektorsatzes im Testgebiet

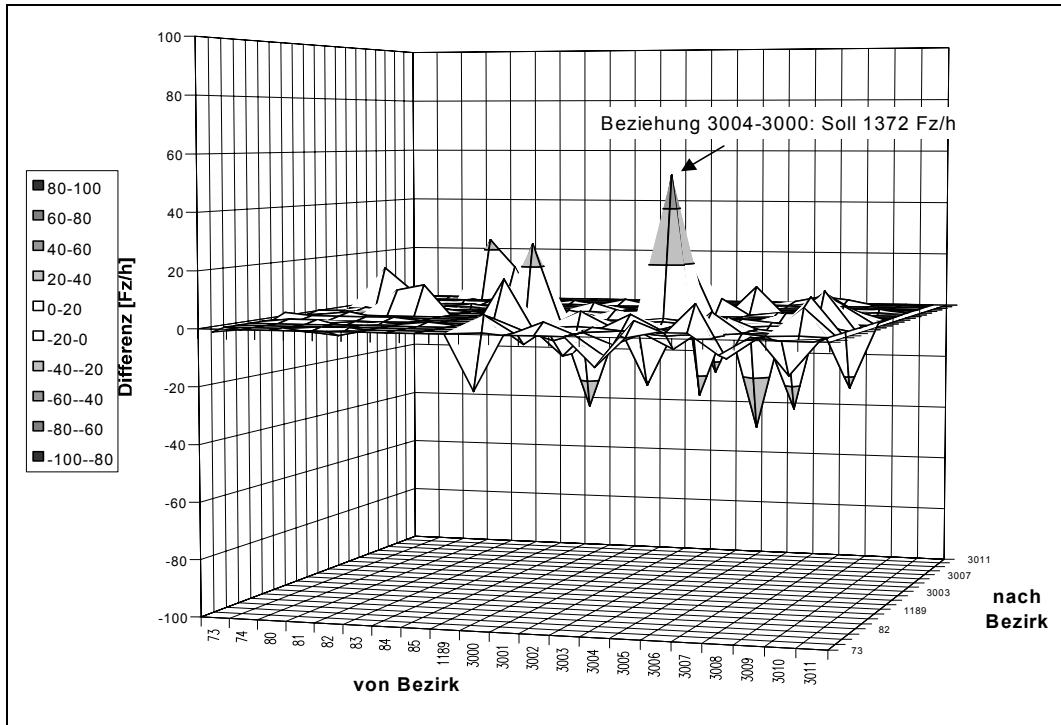


Bild 104: Differenz der Matrizen: $M10(1)v$ (Soll) – $M10(1)v$ (Schätzt)

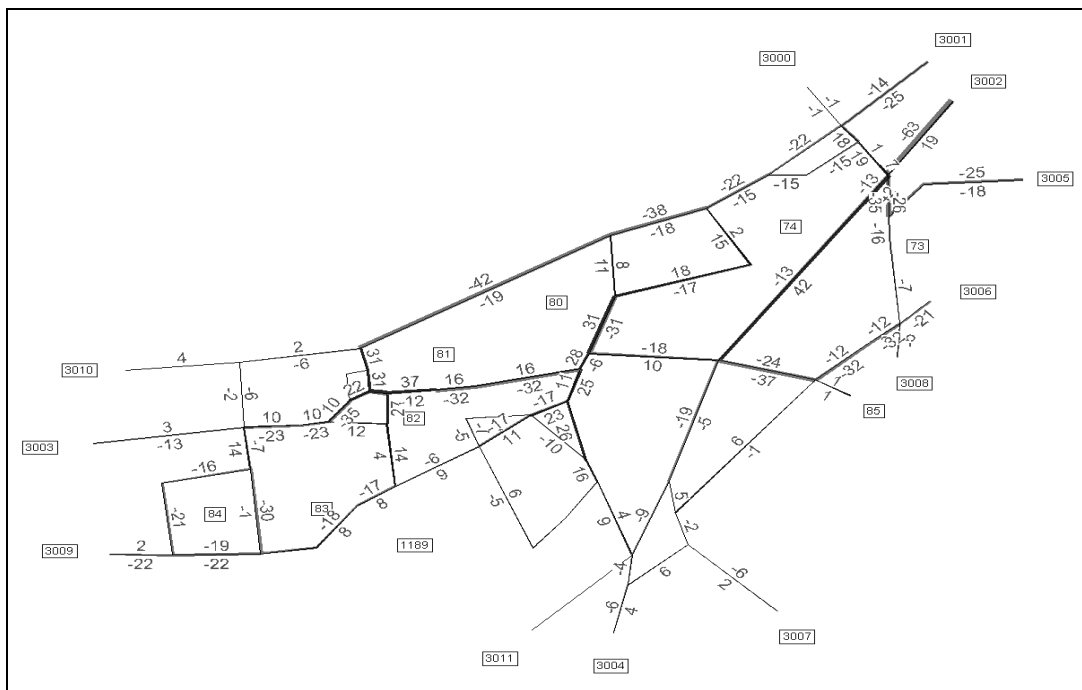


Bild 105: Differenznetz: $M10(1)v$ (Soll) – $M10(1)v$ (Schätzt) bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h]

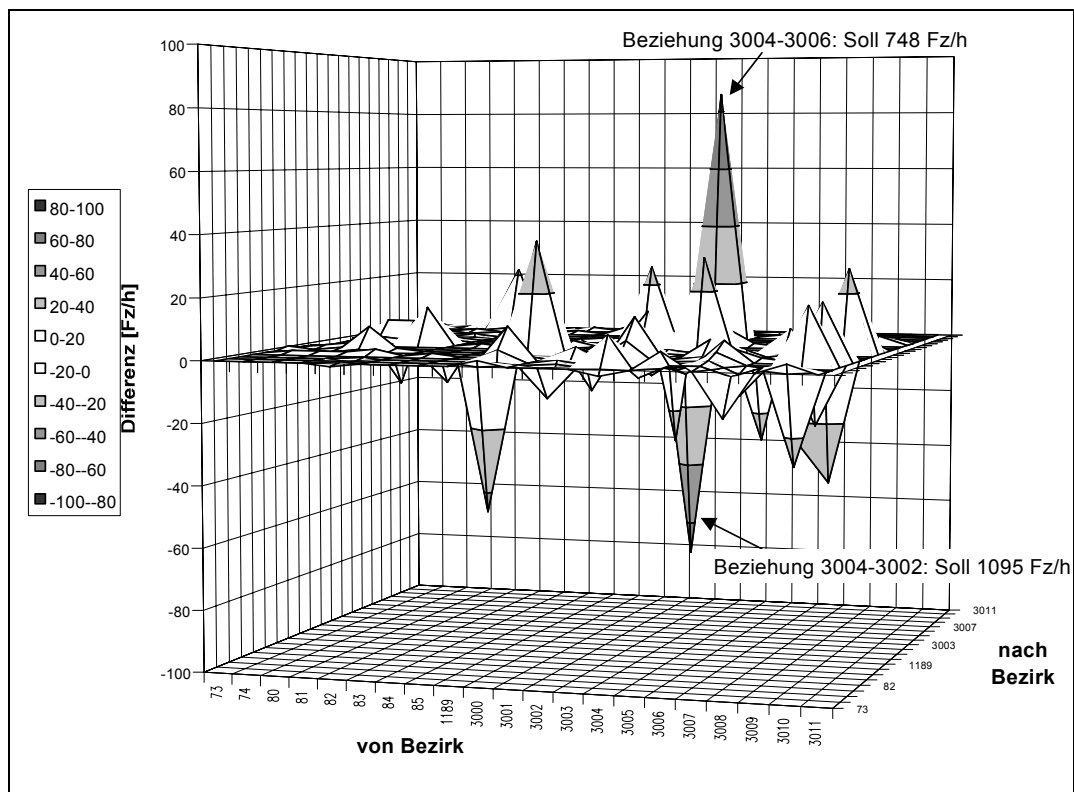


Bild 106: Differenz der Matrizen: $M_{10(2)v}$ (Soll) – $M_{10(2)v}$ (Schätz)

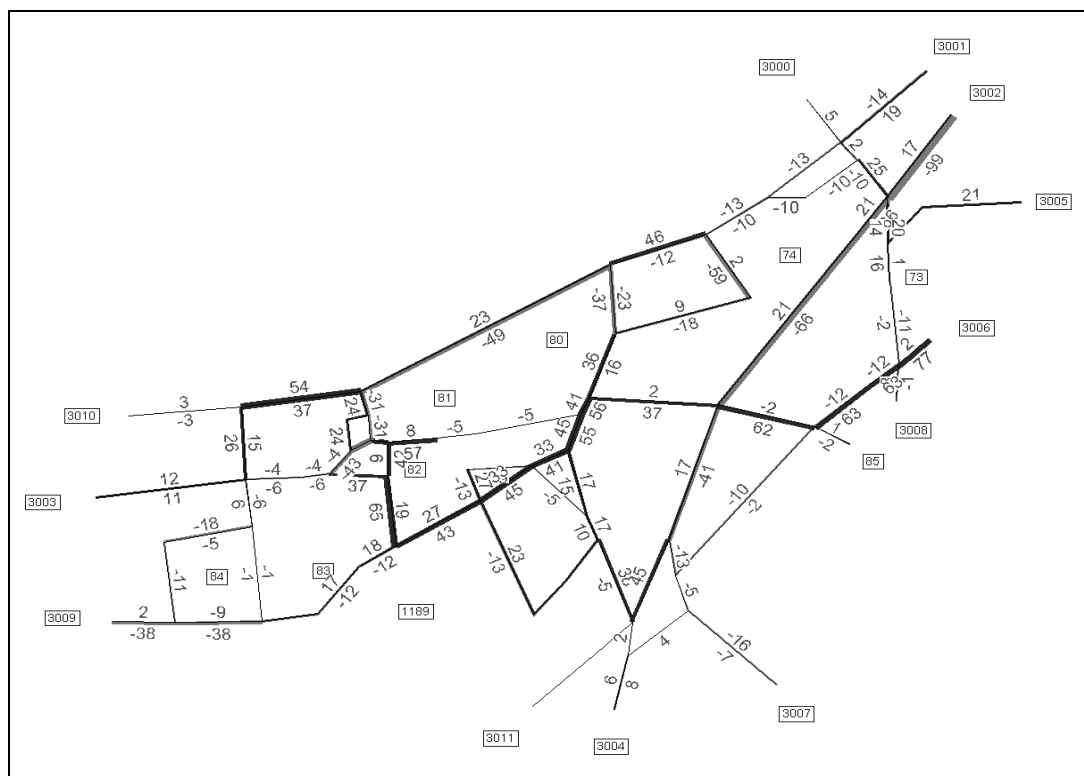


Bild 107: Differenznetz: $M_{10(2)v}$ (Soll) – $M_{10(2)v}$ (Schätz) bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h]

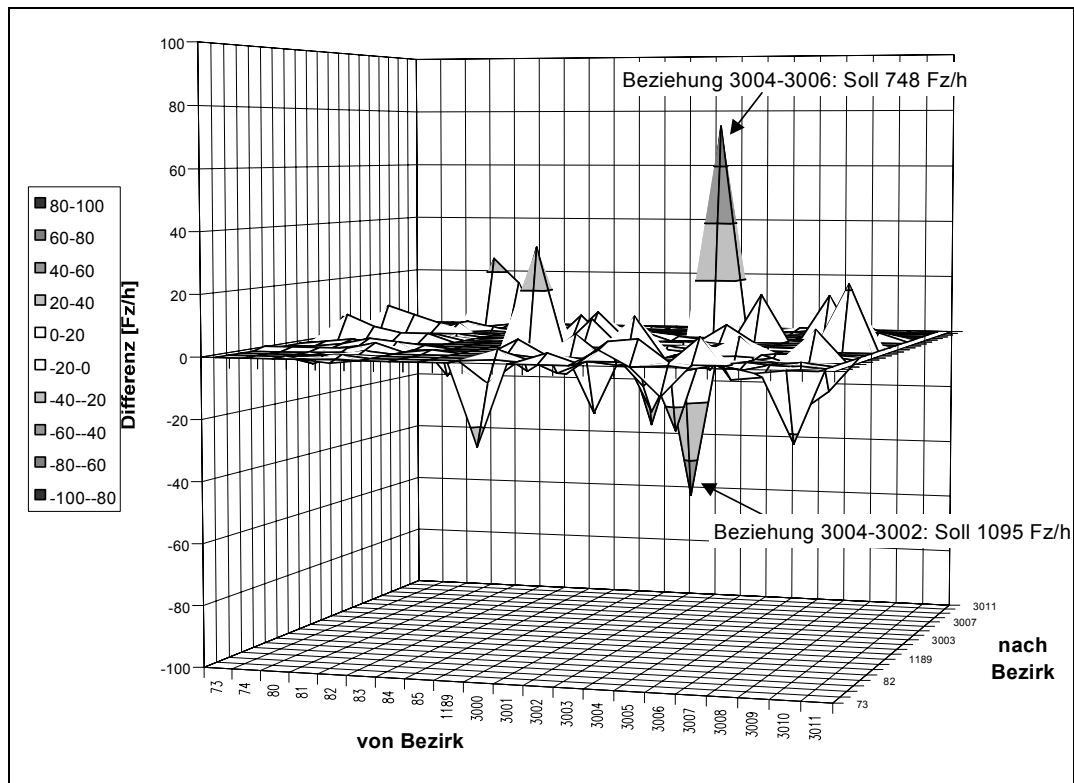


Bild 108: Differenz der Matrizen: $M_{10(3)v}(\text{Soll}) - M_{10(3)v}(\text{Schätz})$

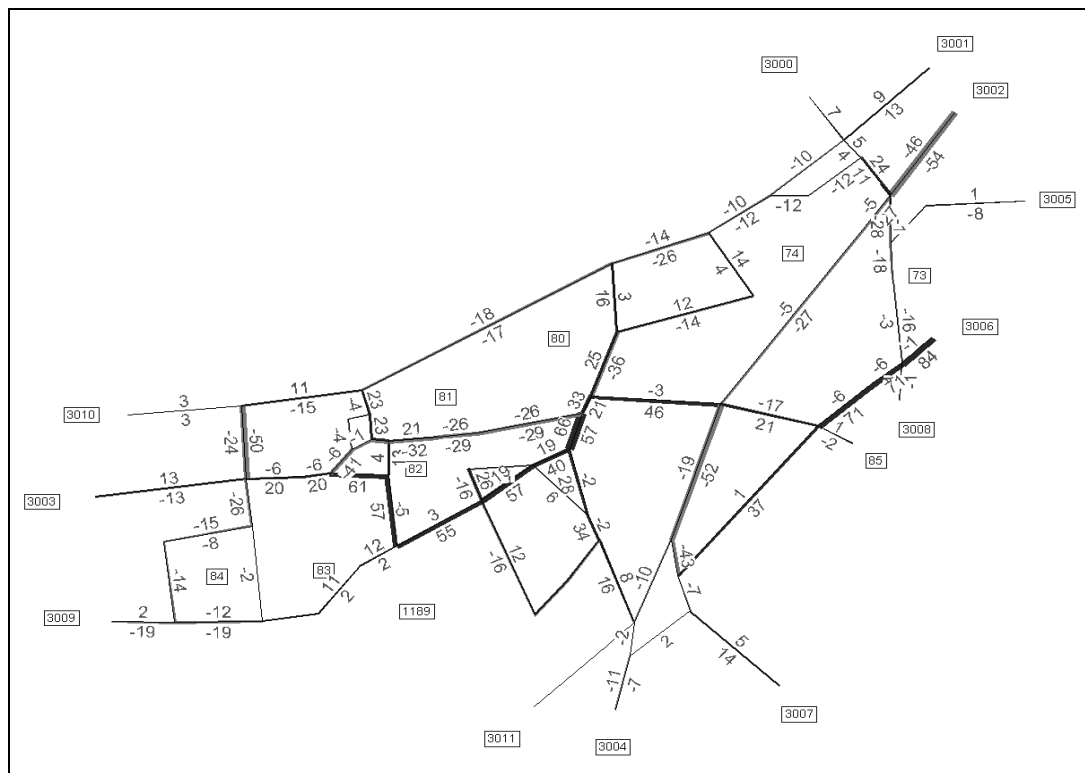


Bild 109: Differenznetz: $M_{10(3)v}(\text{Soll}) - M_{10(3)v}(\text{Schätz})$ bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h]

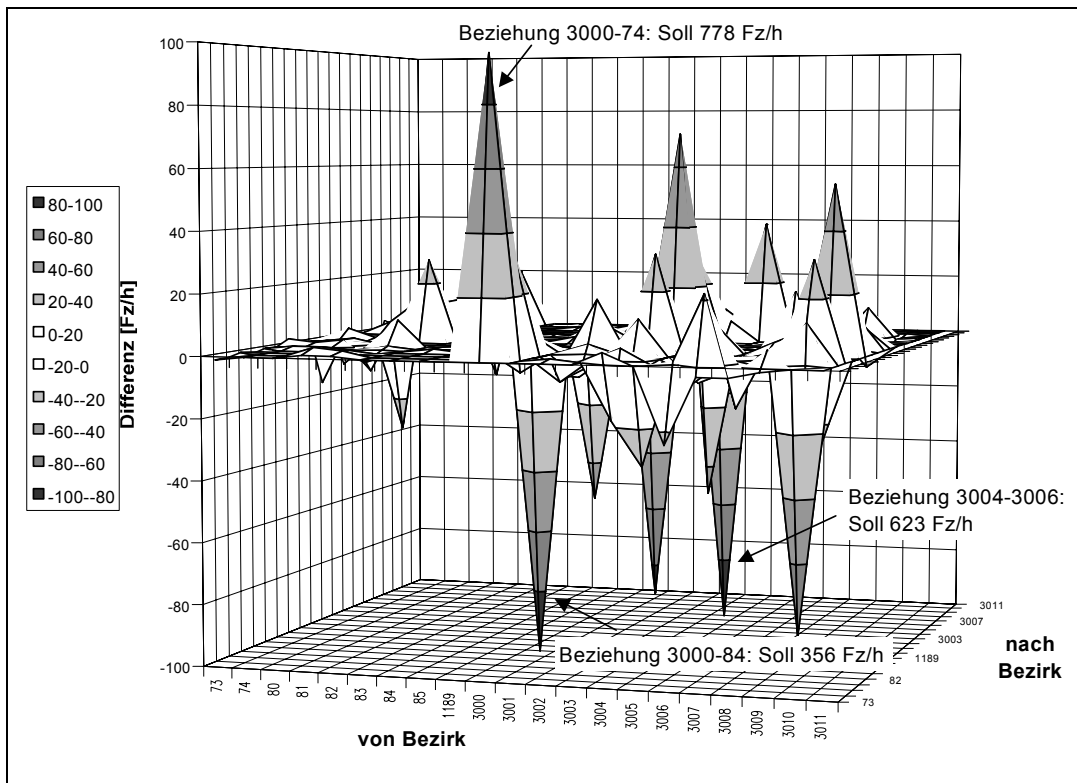


Bild 110: Differenz der Matrizen: $M20(1)v$ (Soll) – $M20(1)v$ (Schätz)

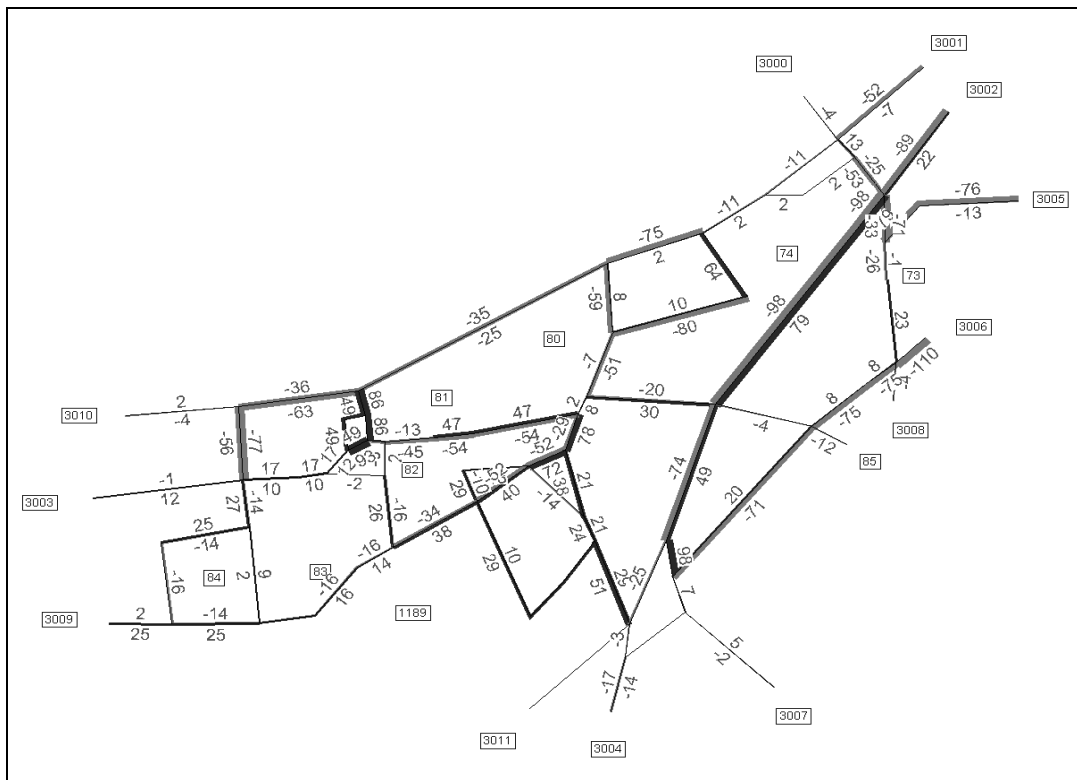


Bild 111: Differenznetz: $M20(1)v$ (Soll) – $M20(1)v$ (Schätz) bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h]

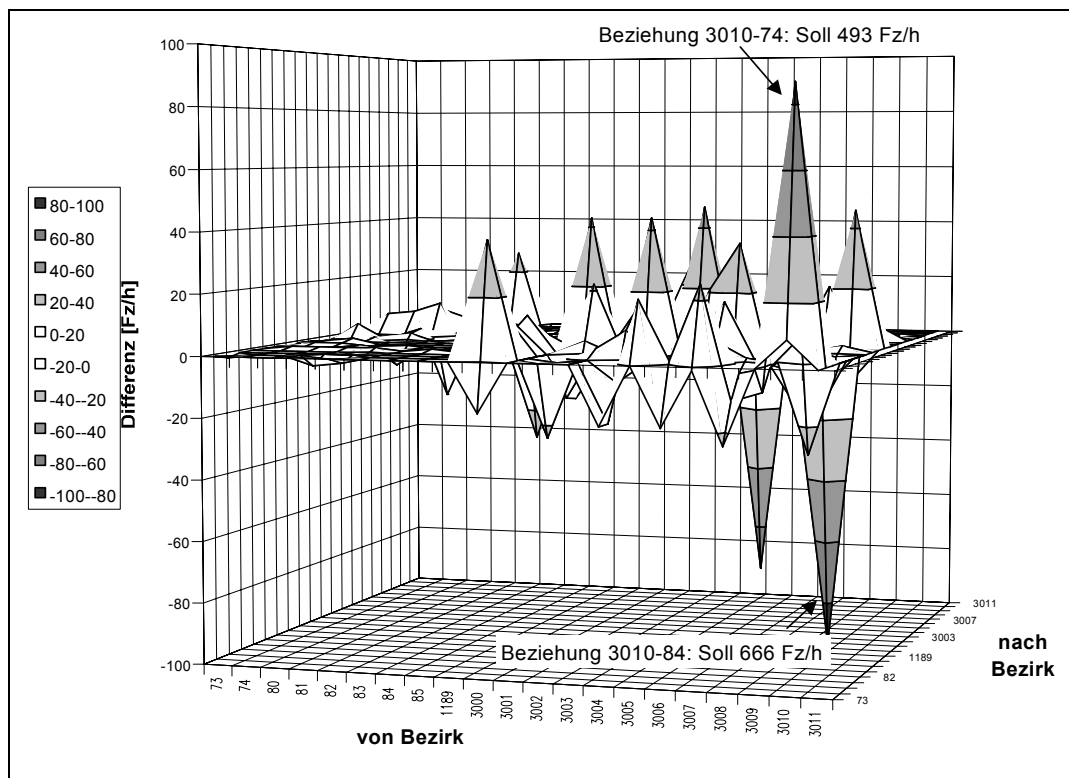


Bild 112: Differenz der Matrizen: $M_{20(2)v}(\text{Soll}) - M_{20(2)v}(\text{Schätz})$

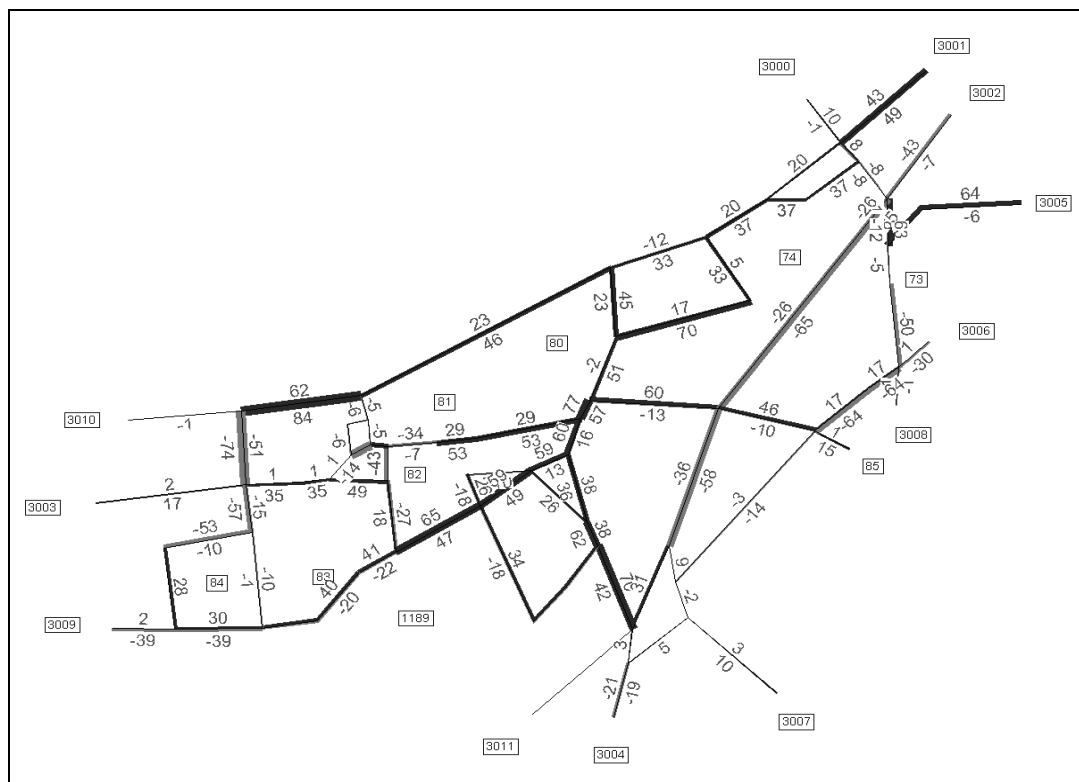


Bild 113: Differenznetz: $M_{20(2)v}(\text{Soll}) - M_{20(2)v}(\text{Schätz})$ bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h]

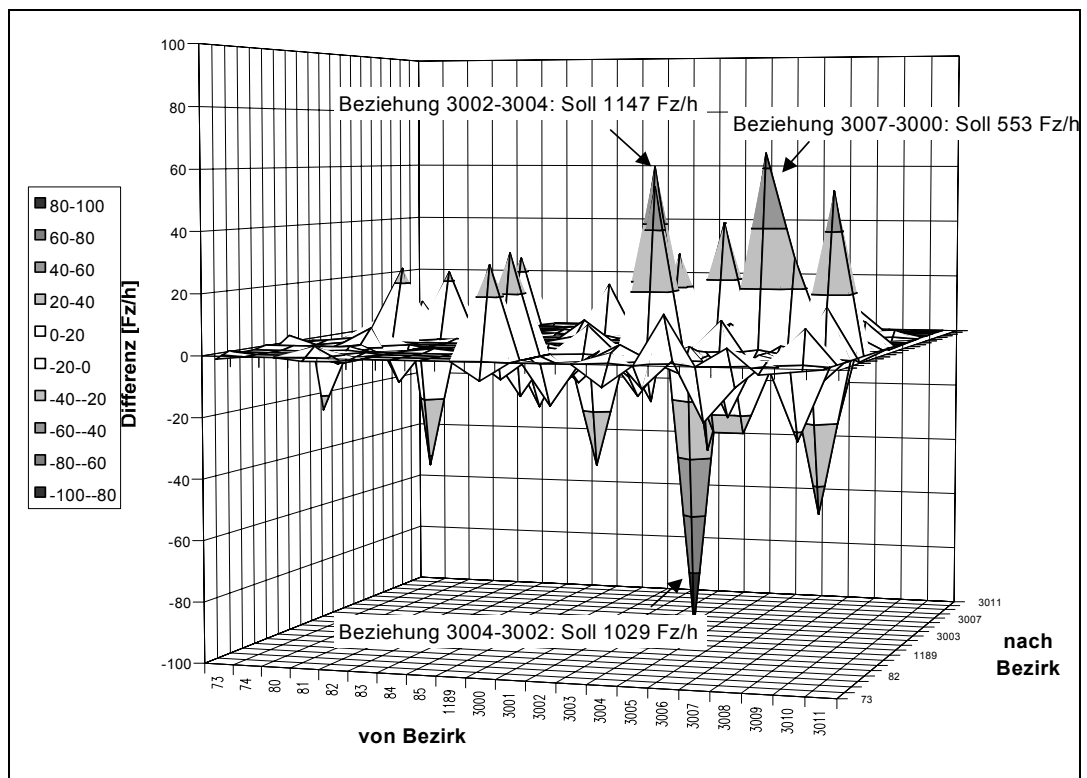


Bild 114: Differenz der Matrizen: $M_{20(3)v}$ (Soll) – $M_{20(3)v}$ (Schätz)

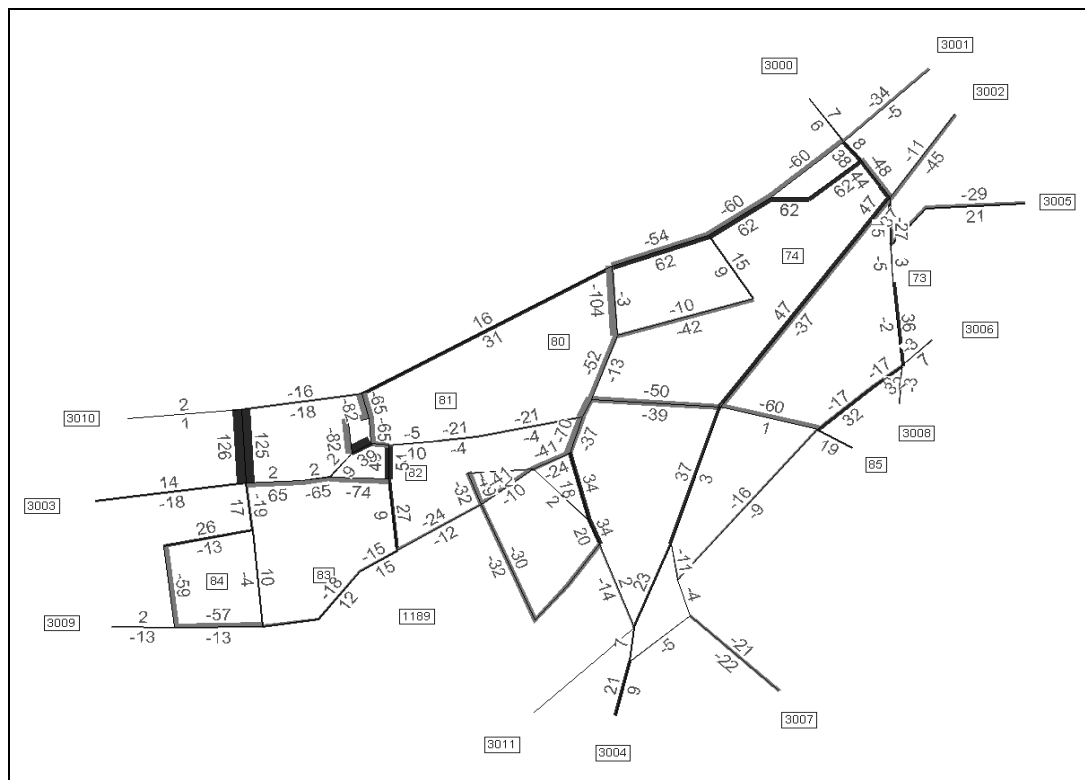


Bild 115: Differenznetz: $M_{20(3)v}$ (Soll) – $M_{20(3)v}$ (Schätz) bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h]

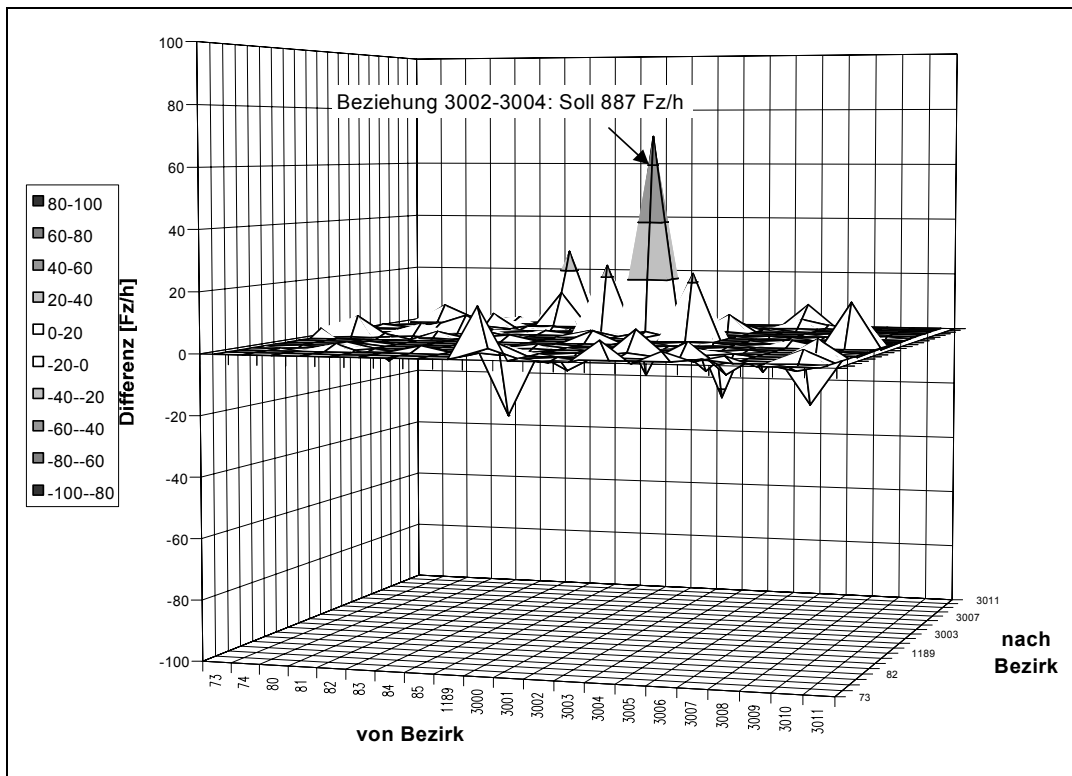


Bild 116: Differenz der Matrizen: $M10(1)_n$ (Soll) – $M10(1)_n$ (Schätz)

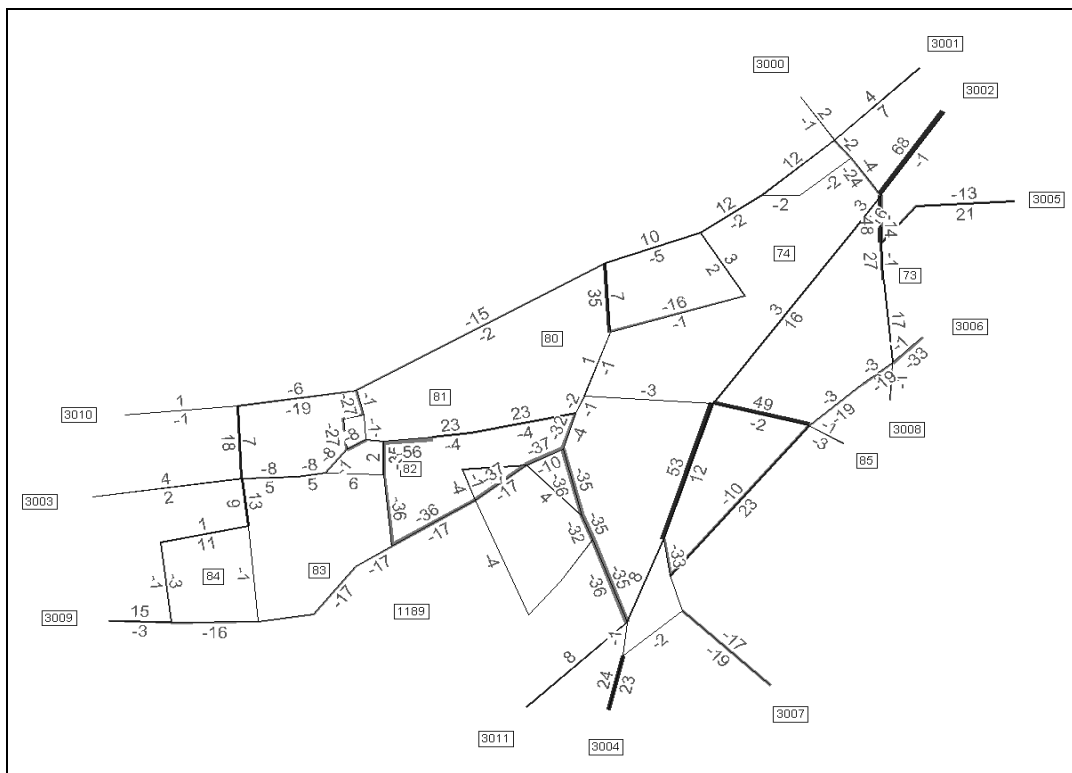


Bild 117: Differenznetz: $M10(1)_n$ (Soll) – $M10(1)_n$ (Schätz) bei Gleichgewichtsumlegung

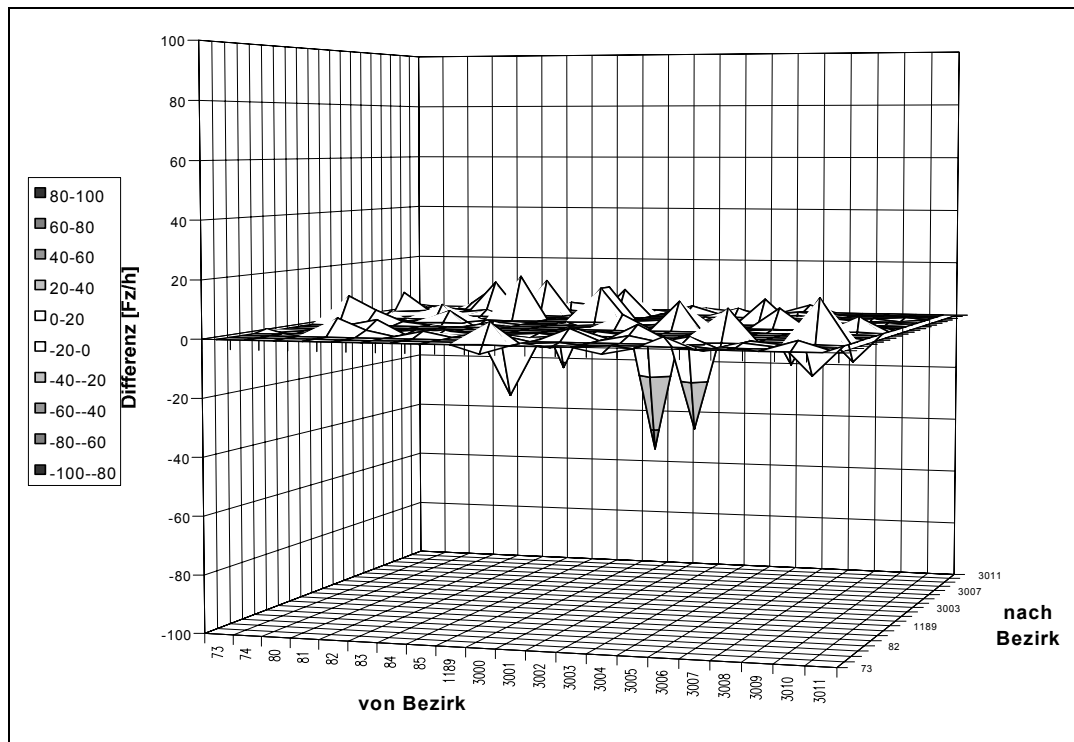


Bild 118: Differenz der Matrizen: $M_{10(2)n}(\text{Soll}) - M_{10(2)n}(\text{Schätz})$

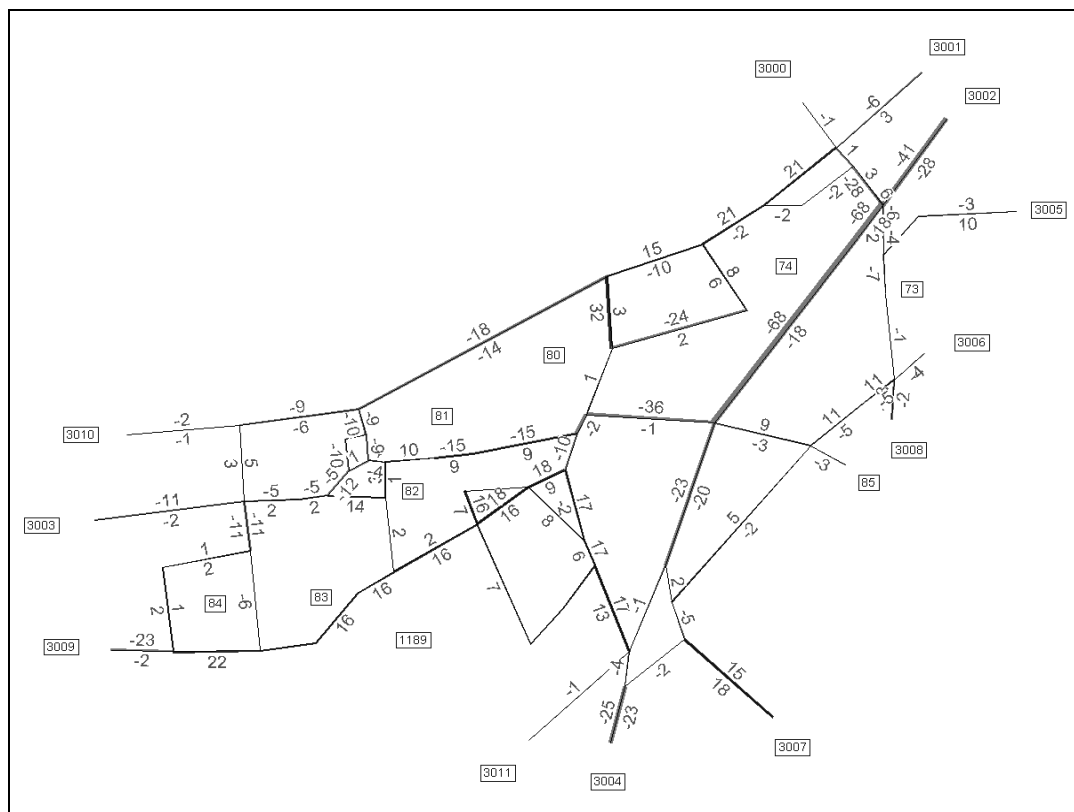


Bild 119: Differenznetz: $M_{10(2)n}(\text{Soll}) - M_{10(2)n}(\text{Schätz})$ bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h]

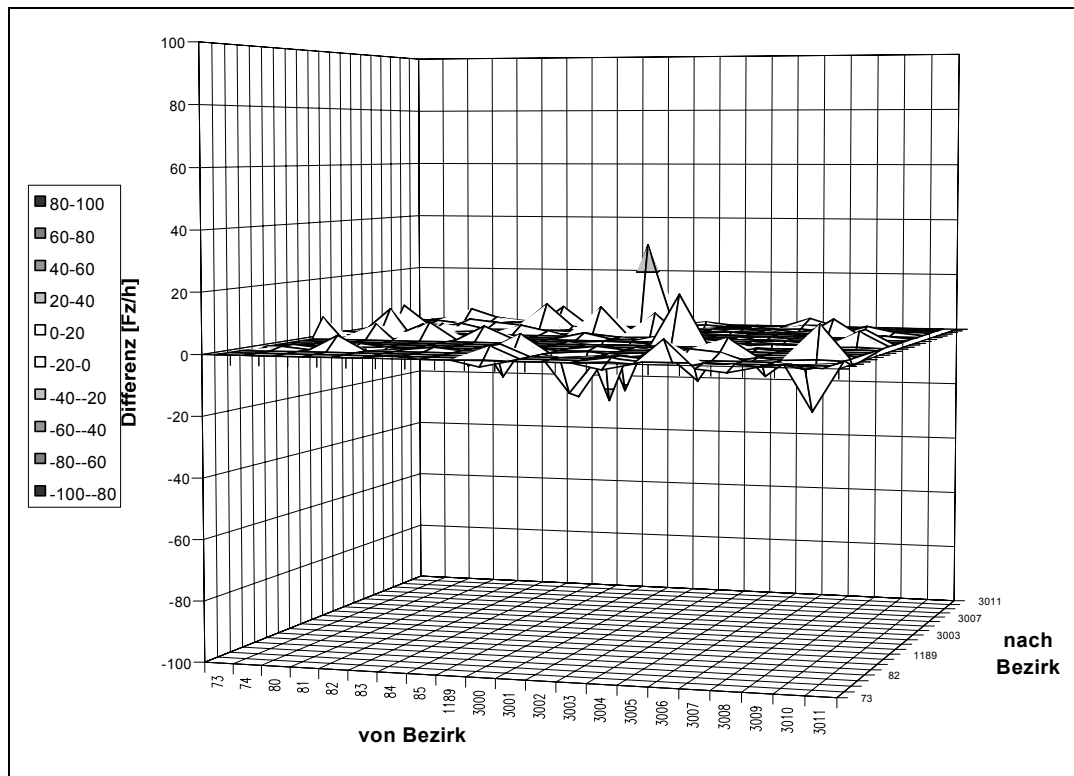


Bild 120: Differenz der Matrizen: $M_{10(3)n}(\text{Soll}) - M_{10(3)n}(\text{Schätz})$

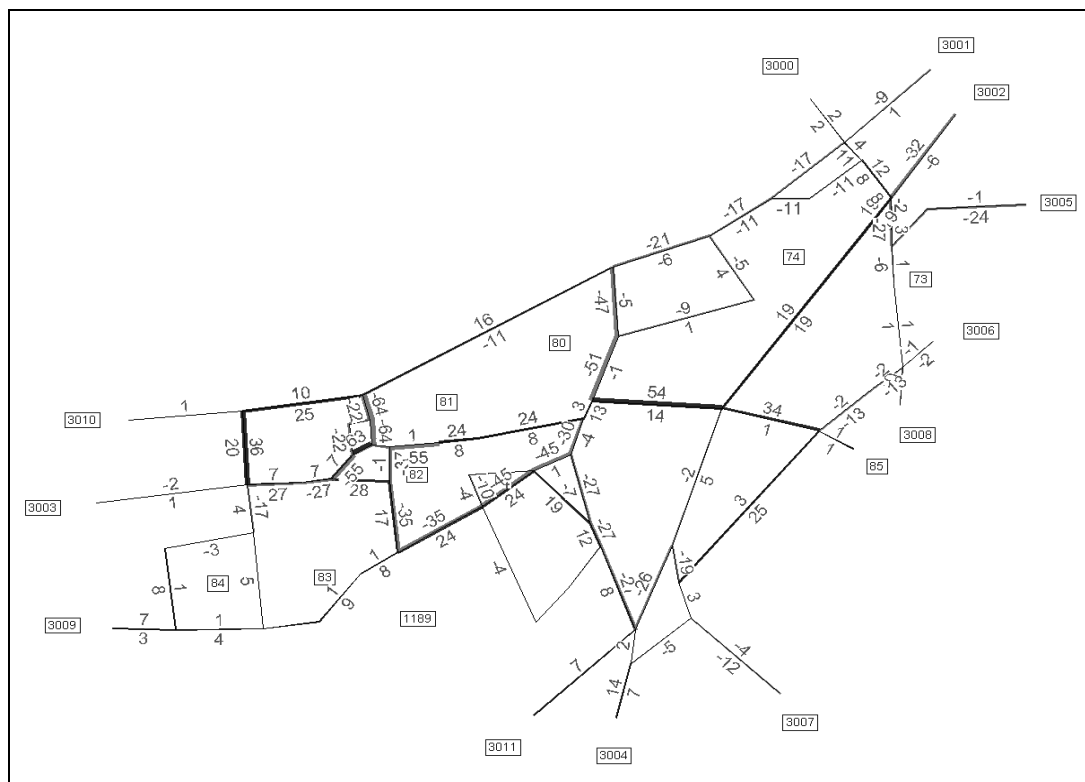


Bild 121: Differenznetz: $M_{10(3)n}(\text{Soll}) - M_{10(3)n}(\text{Schätz})$ bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h]

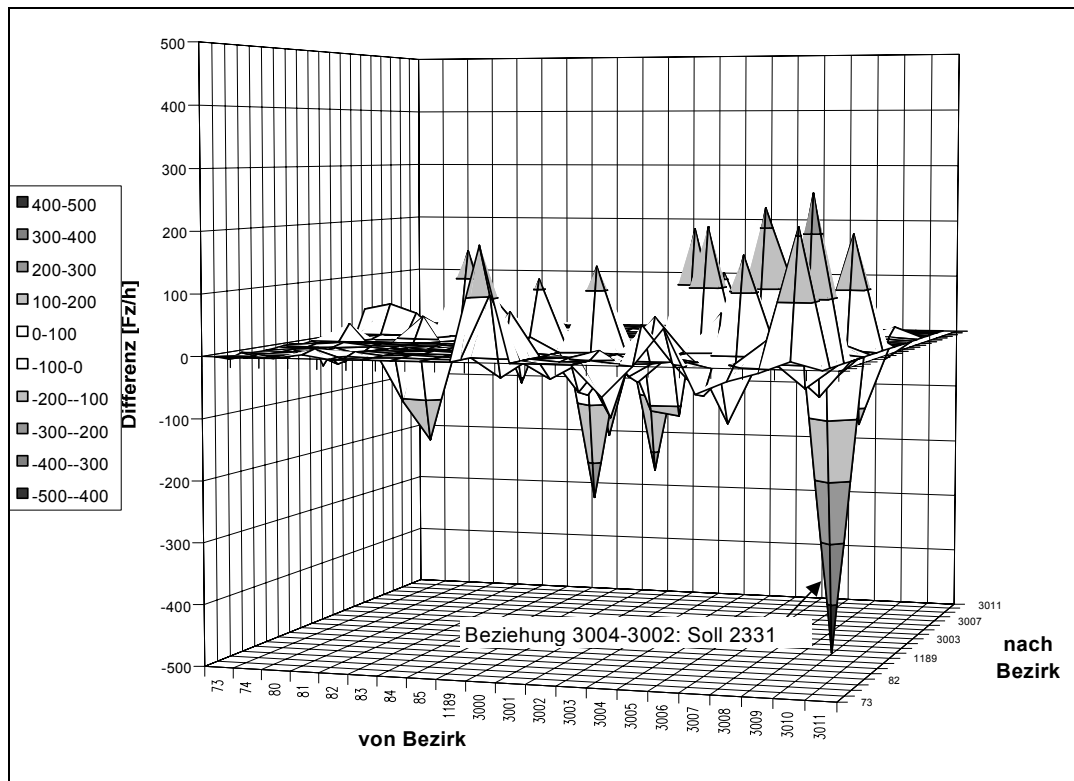


Bild 122: Differenz der Matrizen: M100v (Soll) – M100v (Schätz)

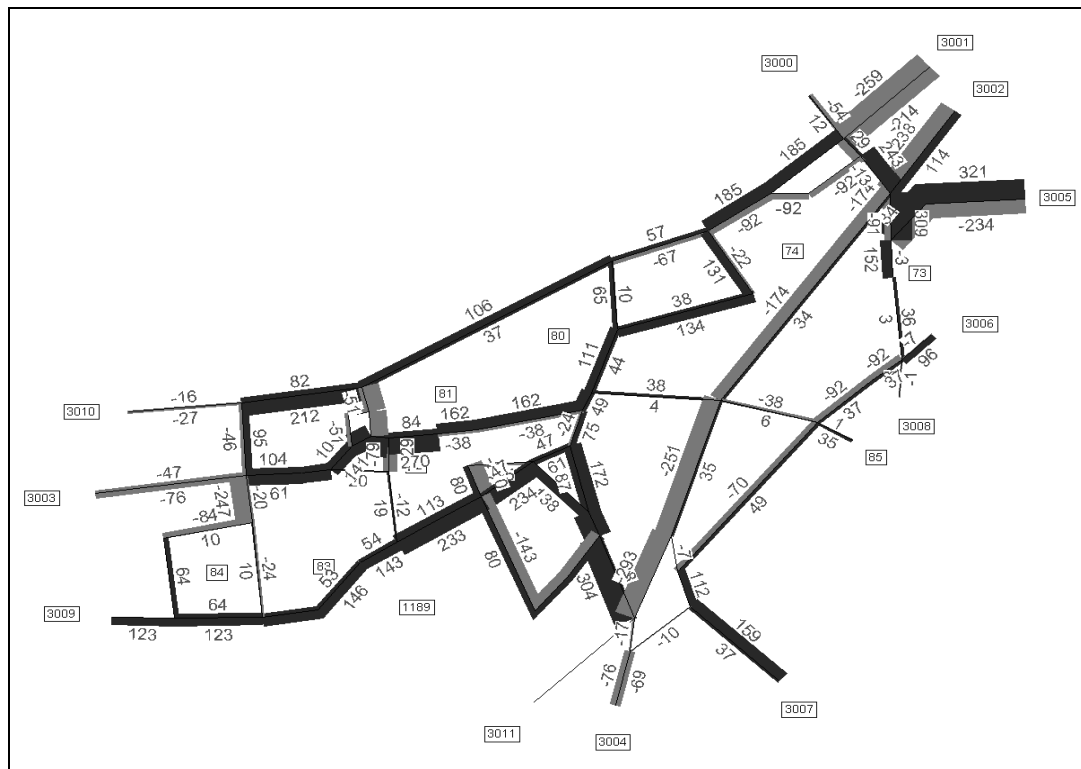


Bild 123: Differenznetz: M100v (Soll) – M100v (Schätz) bei Gleichgewichtsumlegung [Fz/h]

Anlage 9: Abkürzungen

DS1	- Detektorsatznummer
Ffm	- Netzkennzeichnung: Frankfurt (Süd)
G	- Routensuch- und Umlegungsverfahren: Gleichgewichtsverfahren
L	- Routensuch- und Umlegungsverfahren: Lernverfahren
R1	- Auswahlverfahren: "Besten-Bewertung"
R2	- Auswahlverfahren: „Reihen-Bewertung“
R3	- Auswahlverfahren: „OD-Elimination“
R4	- Auswahlverfahren: „Routen-Elimination“
q_f	- Anzahl der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Beziehung f_i im Zeitintervall
q_d	- Anzahl der Fahrzeuge des Detektors d_j im Zeitintervall (=Verkehrsstärke)
q_{df}	- Anzahl der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Beziehung f_i , die im Zeitintervall über den Detektor d_j fahren
q_{dr}	- Anzahl der Fahrzeuge der Route r_k , die im Zeitintervall über den Detektor d_j fahren
Adf	- Relativer Indikator: Anteil des Detektors an der Quelle-Ziel-Beziehung. Der Parameter Adf ist also ein Indiz, ob und zu welchem Anteil die Quelle-Ziel-Beziehung durch den Detektor abgedeckt wird.
Afd	- Relativer Indikator: Anteil des der Quelle-Ziel-Beziehung am Detektor Der Indikator Afd ist also ein Indiz, welcher Anteil der Änderung eines Detektorwertes auf eine bestimmte Quelle-Ziel-Beziehung abfällt, d.h. auch, wie „rein“ die Auswirkung auf die jeweilige Quelle-Ziel-Beziehung ist.
g1	- Gewichtungparameter: Quelle-Ziel-Beziehung
g2	- Gewichtungparameter: Detektor
A1	- Abweichungsparameter: mittlere Abweichungsquadrat (absolut)
A2	- Abweichungsparameter: mittlere Abweichung +/- Standardabweichung (absolut)
A3	- Abweichungsparameter: mittlerer Abweichungsbetrag (absolut)
A4	- Abweichungsparameter: mittlere Abweichungsquadrat (relativ)
A5	- Abweichungsparameter: mittlere Abweichung +/- Standardabweichung (relativ)
A6	- Abweichungsparameter: mittlerer Abweichungsbetrag (relativ)
E (0,80)	- Elimination eine Quelle-Ziel-Beziehung bei Mindestabdeckung Adf > 0,80
VDRM	- Verkehrsdatenbasis Rhein-Main
PFE	- Path Flow Estimator
VISUM	- Makroskopisches Verkehrsplanungstool der Firma PTV AG
MIV	- Motorisierter Individualverkehr

Lebenslauf

Name:	Christine Lotz
Geburtstag	11.10.1966
Geburtsort	Frankfurt/Main
Schulbildung	1973 -1977 Grundschule in Oberursel-Süd 1977 -1983 Integrierte Gesamtschule in Oberursel-Stierstadt 1983 -1986 Berufliches Gymnasium Feldbergschule in Oberursel, Abitur, Leistungsfach Wirtschaft
Berufsausbildung	1986 -1989 Ausbildung zur konstruktiven Bauzeichnerin HOCHTIEF AG, Frankfurt/Main
Hochschulbildung	1989 -1996 Technische Hochschule Darmstadt Fachrichtung Bauingenieurwesen Hauptvertiefungsfach: Eisenbahn-, Straßen- und Verkehrswesen
Berufliche Tätigkeiten	1996 -1999 Wissenschaftliche Mitarbeiterin Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik 1999 -2001 Wissenschaftliche Mitarbeiterin ZIV – Zentrum für integrierte Verkehrssysteme an der Technischen Universität Darmstadt seit 2001 momatec GmbH, Aachen