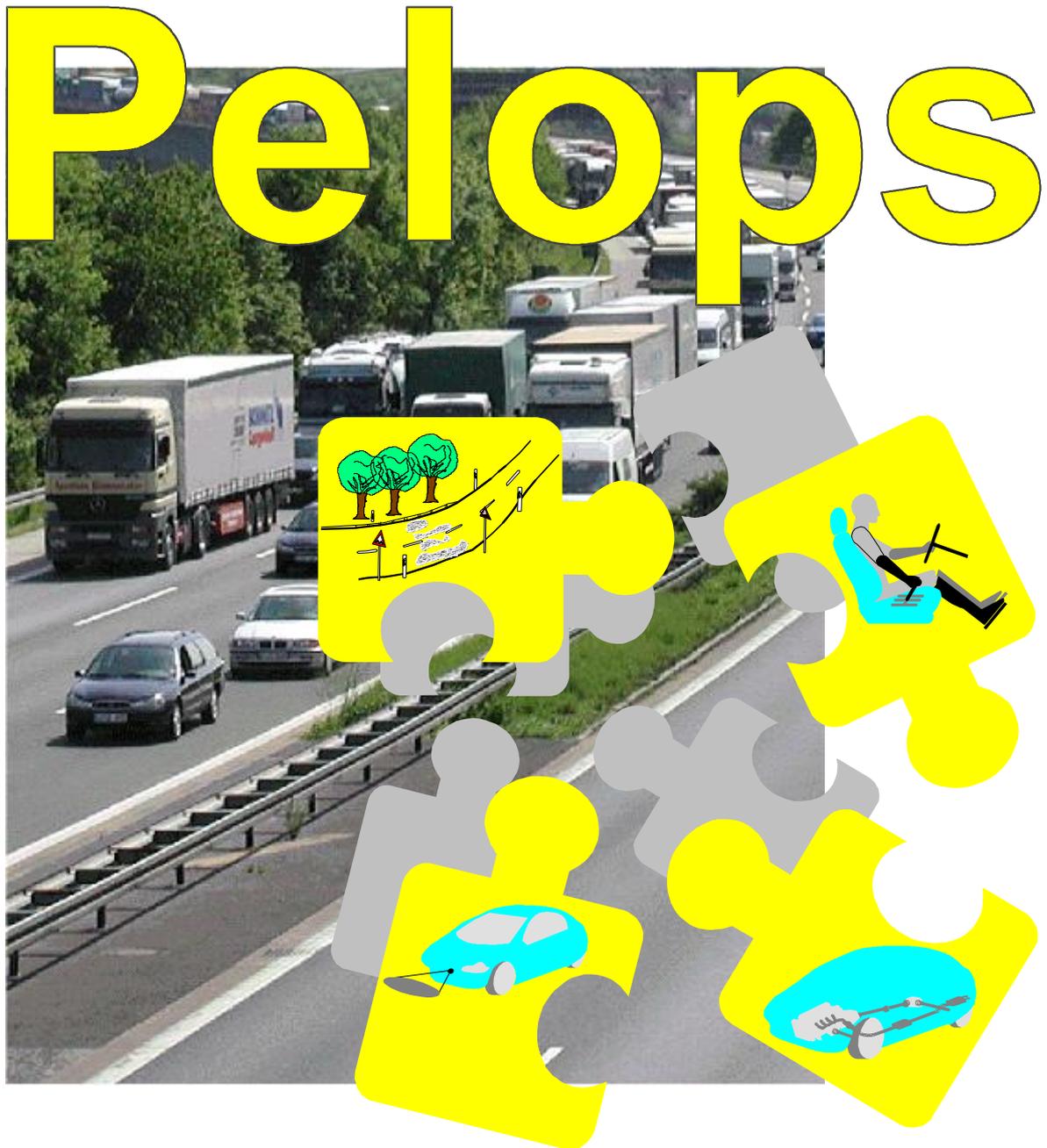


# PELOPS White Paper



## Inhalt

1	PELOPS .....	3
1.1	Einleitung.....	3
1.2	Fahrzeugmodell.....	4
1.2.1	Sensormodell .....	5
1.2.1.1	Sensorlage.....	7
1.2.1.2	Erfassungsgeometrie .....	8
1.2.1.3	Erfassungsfehler .....	8
1.2.1.4	Tracking .....	9
1.3	Fahrermodell .....	9
1.3.1	Folgemodell .....	9
1.3.2	Spurwechselmodell .....	12
1.3.3	Fahrerabhängige Einflussgrößen .....	13
1.4	Umweltmodell .....	17
1.5	Hardware-in-the-Loop – Software-in-the-Loop .....	17
1.6	Bedienung .....	19
2	Literatur .....	21

## 1 PELOPS

### 1.1 Einleitung

Das mikroskopische, fahrzeugorientierte Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS (Programm zur Entwicklung längsdynamischer, mikroskopischer Prozesse in systemrelevanter Umgebung) wurde und wird bei ika/fka in Zusammenarbeit mit der BMW AG entwickelt [LUD89] [DIE95]. Es wird heute von der fka vertrieben und gepflegt.

Das Konzept von PELOPS besteht in der Verknüpfung detaillierter submikroskopischer Fahrzeugmodelle mit mikroskopischen verkehrstechnischen Modellen, die sowohl eine Untersuchung des längsdynamischen Fahrzeugverhaltens als auch eine Analyse des Verkehrsablaufs ermöglichen. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, alle Wechselwirkungen zwischen Fahrer, Fahrzeug und Verkehr berücksichtigen zu können.

Im Gegensatz zu klassischen in der Automobilindustrie angewandten Simulationswerkzeugen, die in der Regel nur ein Teilsystem oder ein einzelnes isoliertes Gesamtfahrzeug abbilden, verfolgt der Ansatz in PELOPS daher die Simulation der drei wesentlichen Elemente des Verkehrs – Strecke/Umwelt, Fahrer und Fahrzeug – mit ihren Wechselwirkungen. In einer modularen Programmstruktur werden die genannten Elemente modelliert und durch Schnittstellen abgegrenzt (vgl. Abbildung 1-1).

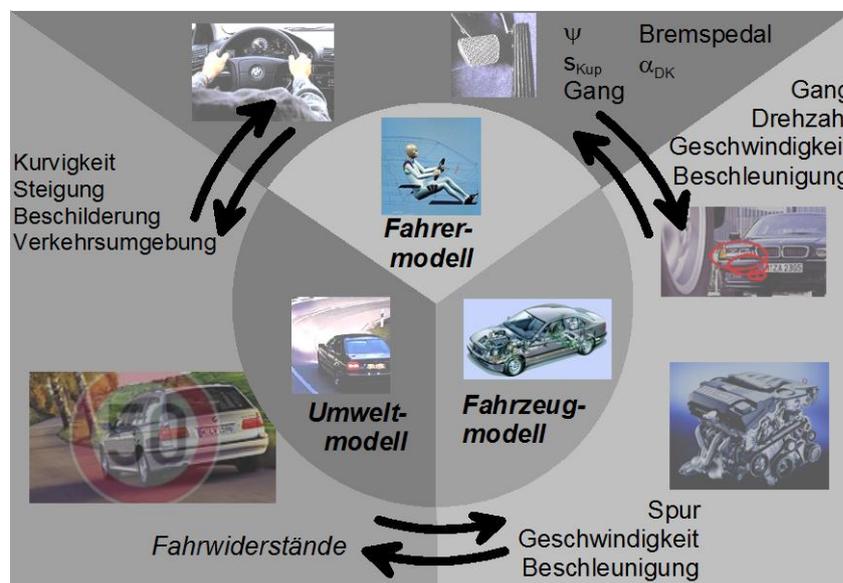


Abbildung 1-1: PELOPS-Struktur

Das Umweltmodell erlaubt bei Bedarf eine detaillierte Beschreibung der Einflüsse einer stationären Verkehrsumgebung. Sowohl der Verlauf der Straße in horizontaler und vertikaler Richtung über Radien und Übergänge, als auch die Anzahl und die Breite der Spuren wird angegeben. Zusätzlich zu diesen geometrischen Daten können Verkehrszeichen sowie Umweltbedingungen vorgegeben werden.

Im Fahrzeugmodell wird ausgehend von den Stellparameter des Fahrzeugs, wie beispielsweise Gaspedalstellung und Gangwechsel, die Bewegungsdynamik berechnet. Da das Fahrzeugmodell komponentenfein und damit sehr detailliert dargestellt wird, können auch Parameter wie Gesamtwirkungsgrad und Verbrauch hinreichend genau bestimmt werden. Das Fahrzeug selbst wird nach dem Ursache-Wirkungs-Prinzip modelliert [BEN01].

Die Verbindung zwischen der Fahrzeug- und der Verkehrssimulation stellt das Fahrermodell dar. Es ist in ein Verhaltens- und ein Handlungsmodell gegliedert. Im Verhaltensmodell werden die Parameter der lokalen Fahrstrategie aus dem aktuellen Fahrzustand und der Fahrzeugumgebung bestimmt. Die Parameter der lokalen Fahrstrategie sind eine vom Fahrer gewünschte Beschleunigung, die Fahrspur und ggf. der einzulegende Fahrgang. Im Handlungsmodell schließlich werden diese Parameter in fahrzeugseitige Stellgrößen wie Lenkbeugung, Pedalbetätigung, Gangwahl und Setzen des Blinkers umgesetzt [NEU03].

Das Verhaltensmodell besteht wiederum aus zwei Teilen, dem Folge- und dem Spurwechselmodell. Das Folgemodell beschreibt den Verkehr auf einer einspurigen Richtungsfahrbahn, auf der es keine Möglichkeit zum Überholen und Spurwechseln gibt. Dieses Folgemodell basiert auf den Arbeiten von Wiedemann [WIE74] und ist in den zurückliegenden zehn Jahren in zahlreichen Punkten bei der fka weiterentwickelt worden. Das Spurwechselmodell deckt alle Verkehrssituationen ab, die auf mehrspurigen Straßen und im innerstädtischen Verkehr auftreten. Es beinhaltet nicht nur die klassischen Spurwechselsituationen, wie das Überholen auf mehrspurigen Richtungsfahrbahnen, das Ausweichen vor Hindernissen und das Spurwechseln zum Verfolgen einer Route durch ein Straßennetz, sondern auch taktische Überlegungen wie z. B. das Blinken, um ein Hereinlassen in enge Lücken zu provozieren [HOC01a]. Fahrer- und Umweltmodell ermöglichen zusammen die Generierung von virtuellem Verkehr.

## 1.2 Fahrzeugmodell

Das Fahrzeugmodell basiert auf dem 'Ursache-Wirkungs-Prinzip', bei dem eine Berechnung der Antriebskraft ausgehend vom Motorbetriebspunkt über Kupplung, Getriebe und Differential zu den Rädern erfolgt, wo die Antriebskraft dann mit den Fahrwiderständen bilanziert wird (vgl. Abbildung 1-2). Der Betriebspunkt wird über die Änderung des Motormomentes (Ursache) gewechselt. Aus der dadurch verursachten Beschleunigung und Geschwindigkeitsänderung resultiert unter Berücksichtigung der Elemente des Antriebsstranges die Motordrehzahl (Wirkung). Als Getriebearten sind das konventionelle Handschalt- sowie Wandlerautomatikgetriebe implementiert. Für Nutzfahrzeuge können zusätzlich eine Motorbremse oder ein Retarder im Antriebsstrang abgebildet werden. Diese detaillierte Abbildung des Fahrzeugs unter Verwendung des Ursache-Wirkungs-Prinzips lässt die Untersuchung regelungstechnischer Einrichtungen wie beispielsweise eines ACC zu.

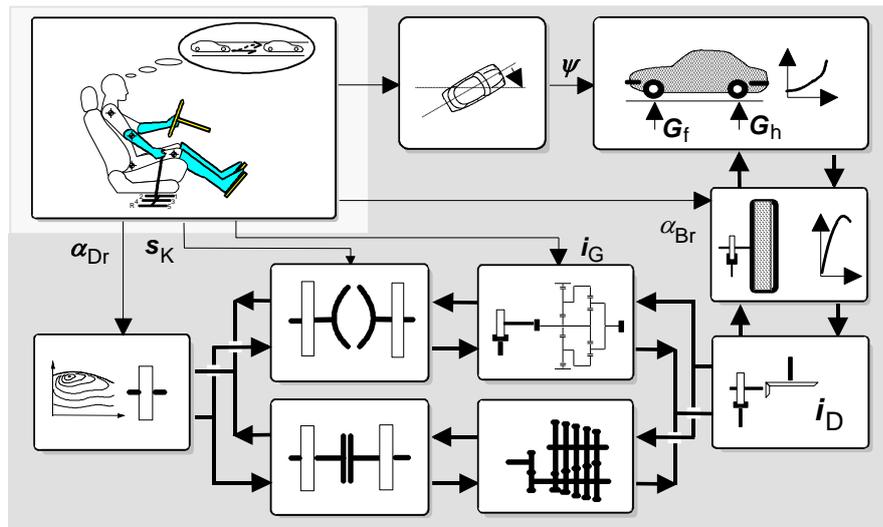


Abbildung 1-2: PELOPS Fahrzeugmodell

Zusätzlich zu der beschriebenen Darstellungsform von Fahrzeugen, die in PELOPS als 'Realfahrzeuge' bezeichnet werden, existiert auch die Möglichkeit, mit einem weniger komplexen Fahrzeugmodell zu arbeiten, um bei geringerem Rechenzeitbedarf Verkehrsphänomene zu untersuchen. So abgebildete Fahrzeuge werden als 'synthetische' Fahrzeuge bezeichnet. Sie lassen sich über einen reduzierten Datensatz beschreiben, der sich aus den Parametern Fahrzeugtyp, maximale Motorleistung, maximale Verzögerung, Gesamtgewicht, Luftwiderstand und Radwiderstand zusammensetzt [WEI99].

Im Fahrzeugmodell wird mit der für jedes synthetische Fahrzeug vorgegebenen maximalen Motorleistung zunächst die Höchstgeschwindigkeit berechnet. Aus dem Verhältnis zwischen der aktuellen und der maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit wird mit Hilfe eines statistischen Ansatzes [DIE95] die aktuelle Übersetzung und der Massenfaktor bestimmt. Damit berechnet sich die maximal mögliche Beschleunigung im aktuellen Fahrzustand unter der vereinfachten Annahme einer linearen Motorkennnung mit Hilfe der Fahrwiderstandsgleichungen bei aktueller Geschwindigkeit und bei Höchstgeschwindigkeit [BRE04].

In [BRE04] ist das PELOPS Fahrzeugmodell dahingehend erweitert worden, dass nun auch das querdynamische Fahrzeugverhalten abgebildet wird. Die Unterscheidung zwischen synthetischen und Realfahrzeugen wird auch bei der Berechnung der Querdynamik weiter aufrecht erhalten. Synthetische Fahrzeuge werden anhand eines vereinfachten Einspurmodells für stationäre Kreisfahrt abgebildet, für Realfahrzeuge wird das Einspurmodell für instationäres Verhalten verwendet [WAL00].

### 1.2.1 Sensormodell

Das Sensormodul erlaubt den Anwendern, beliebig viele Sensoren an beliebigen Stellen des Fahrzeugs zu positionieren. Die Sensoreigenschaften, wie beispielsweise Öffnungswinkel, Reichweite und Fehlerrate können frei vorgegeben werden. Die Eingabe der Sensordaten

erfolgt über die sog. Sensorkonzept-Datei (s. Abbildung 1-3), die über die grafische Oberfläche von PELOPS anwählbar ist. Hier werden alle im Fahrzeug verbauten Sensoren zusammengefasst. Für jeden im Konzept verwendeten Sensor kann eine eigene Taktrate definiert werden.

```
PELOPS Version 4.0
* SENSORKONZEPT Beispiel
  Mein_Konzept
*
*
* Anzahl Sensoren:
  2
* Sensornr      Position          Winkel  Y-Versatz  X-Versatz  Takt
* [-]           1/-1=vorn/hinten  [o]    [m]        [m]        [s]
* 3             1                0      -.5        0          0.1
* 4             1                0      -.5        0          0.4
```

Abbildung 1-3: Sensorkonzept-Datei, senso'x'.data<sup>1</sup>

Für alle im Sensorkonzept aufgeführten Sensoren existiert eine Initialisierungsdatei (s. Abbildung 1-4), in der die Erfassungsgeometrie, die Erfassungsfehler und das Tracking festgelegt werden.

```
PELOPS Version 3.0
* SENSORDATEN
  Beispielsensor
*
*
* Abschnittanzahl  Verdeckung          Verrauschen          id. Tracking
* [-]              0/1=nein/ja         0/1=nein/ja         0/1=nein/ja
* 3                1                    1                    1
* Abstand          Geschw.              Refl.zent.            Kante
* max.F. [m]       max.F. [m/s]        max.F. [m]           max.F. [m]
* 5                3                    0                    0
* %Fehl            %Fehl               %Fehl                %Fehl
* 10               5                    0                    0
* Abs.Laenge [m]  Pol3                 Pol2                  Pol1
* 50               0                    0                    1
* 70               0                    1                    0
* 80               0                    0                    0.5
```

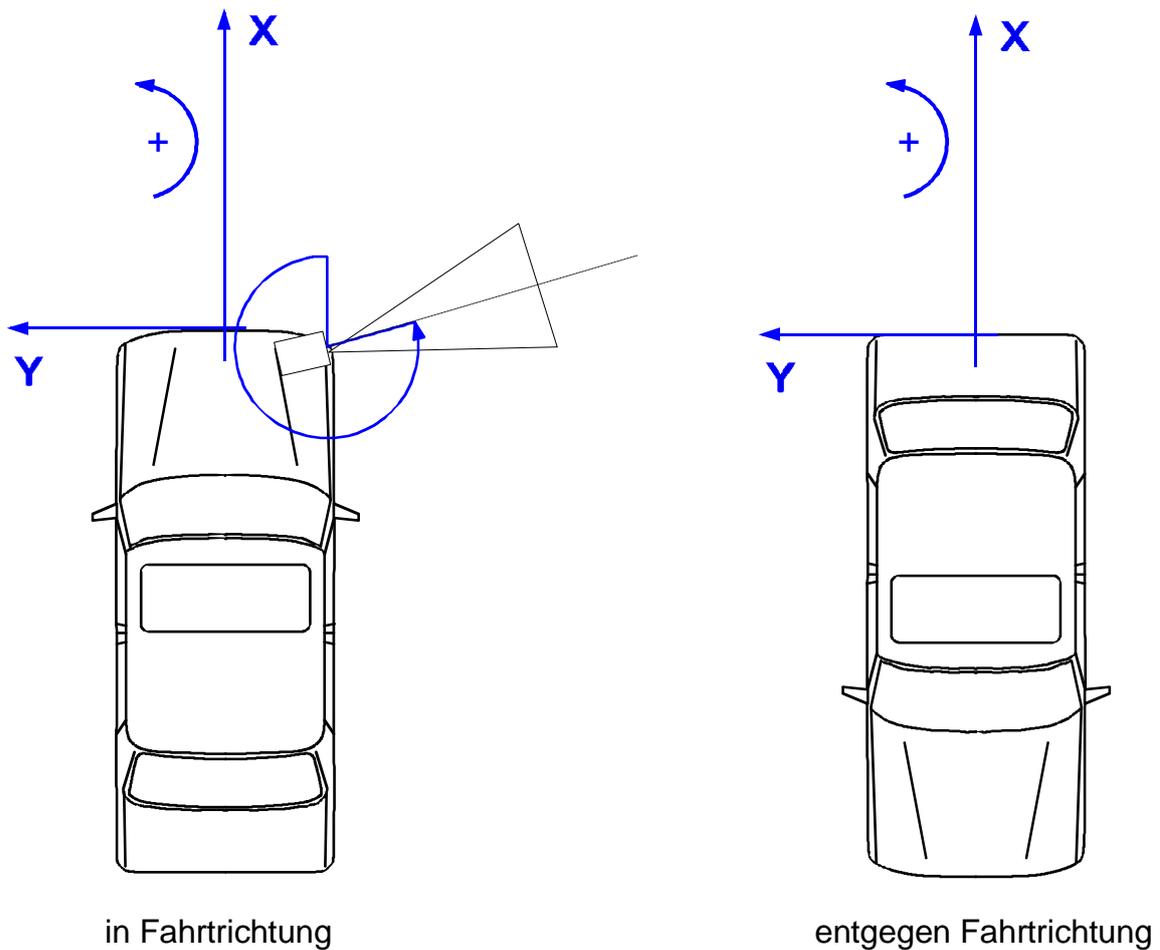
Abbildung 1-4: Sensor-Initialisierungsdatei, sen'y'.data<sup>2</sup>

<sup>1</sup> x = Nummer des Sensorkonzeptes

Die Kenngrößen der Dateien werden im Folgenden vorgestellt. Die Schlüsselwörter der Sensordefinition sind jeweils *kursiv* hervorgehoben.

### 1.2.1.1 Sensorlage

Die folgende Abbildung zeigt die Bezugskoordinatensysteme für Sensoren die in Fahrtrichtung (*Position* = 1) und die entgegen der Fahrtrichtung (*Position* = -1) montiert werden. *Y-Versatz* [m] und *X-Versatz* [m] werden entsprechend dieser Bezugskoordinatensysteme festgelegt. Der *Winkel* [°] bezieht sich auf die Mittelachse des Sensors (positive Drehrichtung = entgegen dem Uhrzeigersinn).



© fka 0Ne0148.ds4

Abbildung 1-5: Definition der Sensorlage

<sup>2</sup>y = Sensornummer, in Übereinstimmung mit der angegebenen Sensornr. im Sensorkonzept

### 1.2.1.2 Erfassungsgeometrie

Die Erfassungsgeometrie eines Sensors wird *abschnittsweise* mit Hilfe eines Polynoms 3-ten Grades definiert, das links (positives Vorzeichen) und rechts (negatives Vorzeichen) der Sensormittellinie gilt.

$$\text{Erfassungsgrenze}_{\text{links/rechts}} = \pm \left( \text{Pol1} \cdot x + \text{Pol2} \cdot x^2 + \text{Pol3} \cdot x^3 \right) \Big|_1^{\text{Anz. d. Abschnitte}} \quad [\text{m}]$$

Diese Erfassungsgrenze des Sensors wird abschnittsweise festgelegt. Dies bedeutet, dass die x-Koordinate für jeden Sensorabschnitt von 0 bis zur *absoluten Länge* des Abschnitts gezählt wird.

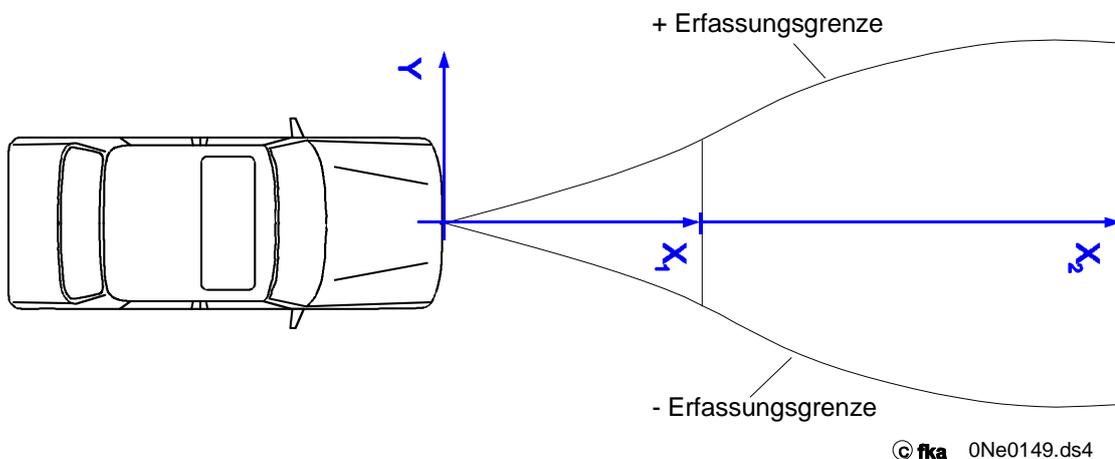


Abbildung 1-6: Definition der Erfassungsgeometrie

Zusätzlich zur Erfassungsgeometrie kann festgelegt werden, ob der Sensor die *Verdeckung* seines Blickfelds durch Kanten benachbarter Objekte berücksichtigen soll. Es werden dann für jede Verdeckung die Abschattungswinkel berechnet und ausgewertet.

### 1.2.1.3 Erfassungsfehler

Die Erfassung durch den Sensor kann fehlerfrei oder mit *Verrauschen* der Messdaten erfolgen. Wird die Option *Verrauschen* in der Sensor-Initialisierungsdatei ausgewählt, können die *maximalen absoluten und prozentualen Erfassungsfehler* für die Größen

- *Abstand* [m],
- *Differenzgeschwindigkeit* [m/s],
- laterale Ablage des *Reflektionszentrums* eines Zielobjektes [m] sowie
- laterale Ablage der nächsten Zielkontur (*Kante*) [m]

getrennt angegeben werden.

Das Reflexionszentrum wird über eine gleichverteilte Zufallszahl beliebig auf dem Fahrzeugheck gebildet. Für jeden Zeitschritt des Sensors wird das *Reflexionszentrum* neu gebildet, es springt dementsprechend auf dem Fahrzeugheck hin und her. Die Kenngröße *Kante* bezeichnet den lateralen Abstand zur nächst liegenden Kontur eines Zielfahrzeugs.

#### 1.2.1.4 Tracking

Standardmäßig ist ein ideales Tracking aktiviert. Alternativ kann ein reales Tracking-Modul in die Simulationsumgebung integriert werden.

### 1.3 Fahrermodell

#### 1.3.1 Folgemodell

Das Modell des Folgeverhaltens basiert auf dem psycho-physischen Ansatz von Wiedemann. Abhängig von gefahrener Geschwindigkeit und fahrerindividuellen Parametern, wie Schätzvermögen und Sicherheitsbedürfnis, werden Wahrnehmungsschwellen definiert. Diese Wahrnehmungsschwellen unterteilen je nach Differenzgeschwindigkeit und Abstand zum Vorausfahrenden das Fahren in vier Teile: unbeeinflusstes Fahren, Annähern, Folgen und Bremsen. In Abbildung 1-7 sind die Grenzen und die Fahrbereiche beispielhaft aufgeführt.

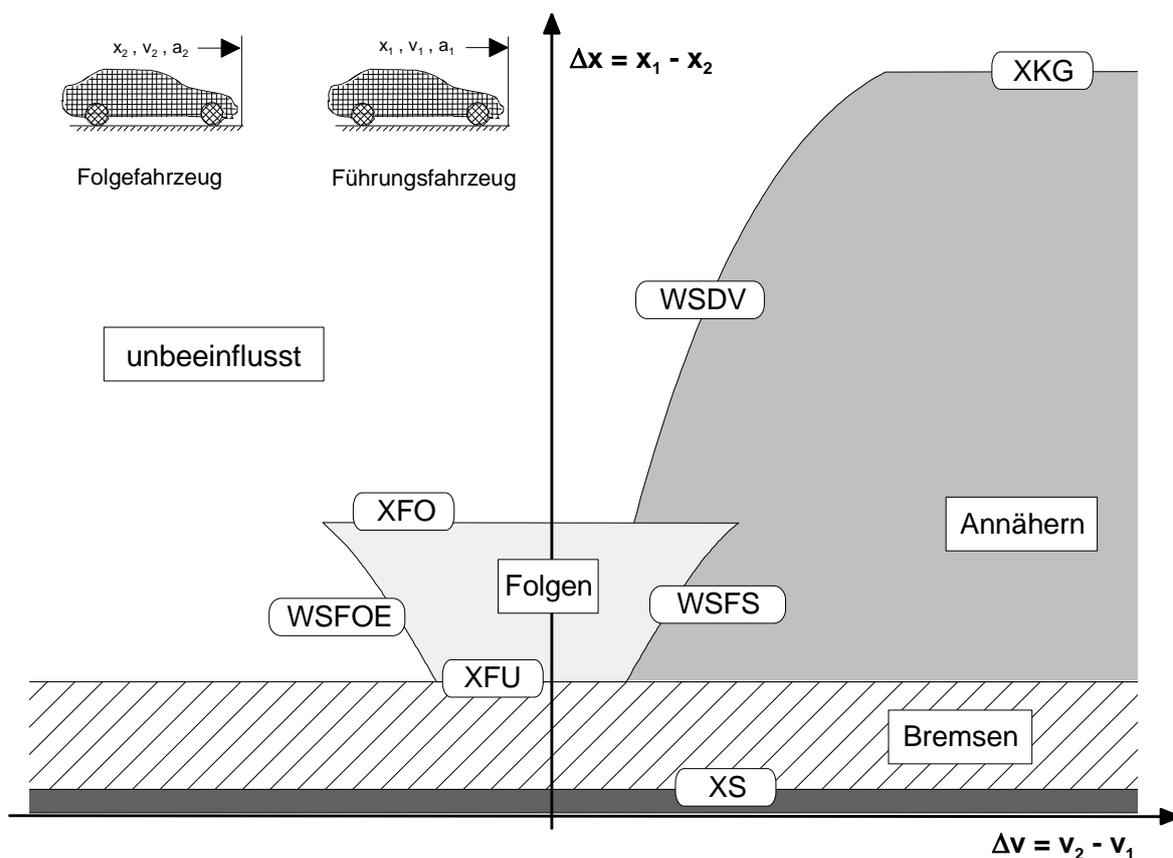


Abbildung 1-7: Wahrnehmungsmodell nach Wiedemann

Die Grenzen sind im ursprünglichen Modell:

- XS** ist der gewünschte Bruttoabstand beim Stillstand. Er setzt sich aus der Länge des Führungsfahrzeuges (bei Wiedemann 4,5 m [WIE74]) und einem vom Sicherheitsbedürfnis abhängigen Nettoabstand zusammen.
- XFU** ist der gewünschte minimale Abstand beim Folgen. Zusätzlich zum Stillstandsabstand (XS) wird noch ein geschwindigkeitsabhängiger Abstand eingehalten, der mit dem Sicherheitsbedürfnis gewichtet wird. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit ist dabei parabolisch.
- XFO** ist der obere Folgeabstand. Er liegt fahrerabhängig im Bereich des 1,5- bis 2,5-fachen des unteren Folgeabstandes und wird abhängig von XS, XFU sowie Schätzvermögen und Tagesschwankung festgelegt.
- WSDV** ist die Wahrnehmungsschwelle für Geschwindigkeitsdifferenzen bei großen Abständen. Sie ist abhängig vom Sicherheitsbedürfnis und Schätzvermögen.
- WSFS** ist die Wahrnehmungsschwelle für Geschwindigkeitsdifferenzen bei kleinen abnehmenden Abständen. Sie ist abhängig von dem Schätzvermögen, dem Sicherheitsbedürfnis und der Tagesschwankung.
- WSFOE** ist die Wahrnehmungsschwelle für Geschwindigkeitsdifferenzen bei kleinen zunehmenden Abständen. Sie wird aus WSFS und dem Parameter für die Tagesschwankung errechnet. Zusammen mit WSFS, XFO und XFU grenzt sie den Folgebereich ein.
- XKG** ist der Grenzwert für die Wahrnehmung von Objekten (Fremdfahrzeuge, Schilder, usw.). Der Fahrer nimmt nur Objekte wahr, die innerhalb dieses Grenzwertes liegen.

Die zur Ermittlung notwendigen Größen Schätzvermögen, Sicherheitsbedürfnis und Tagesschwankung liegen im Wertebereich zwischen 0 und 1. Es sind normierte Parameter, die für die gesamte Fahrerpopulation normalverteilt um den Mittelwert 0,5 festgelegt werden.

Durch die oben beschriebenen Wahrnehmungsgrenzen werden vier Bereiche unterschiedlichen Verhaltens voneinander abgetrennt.

Das unbeeinflusste Fahren ist dadurch geprägt, dass kein Vorderfahrzeug existiert, das der Fahrer als beachtenswert einstuft. Er versucht, in diesem Bereich seine Wunschgeschwindigkeit zu halten bzw. durch Beschleunigung zu erreichen.

Im Bereich des bewusst beeinflussten Fahrens nähern sich die Fahrer einem wahrgenommenen Führungsfahrzeug, das langsamer ist. Sie versuchen dabei einen individuellen Mindestabstand einzuhalten und die Geschwindigkeit auf die des vorderen Fahrzeugs anzupassen.

Das Folgen eines Vorderfahrzeugs mit geringer Differenzgeschwindigkeit und geringem Abstand wird im Bereich des unbewusst beeinflussten Fahrens abgebildet. Die Fahrer versuchen ihre Geschwindigkeit dem Vorfahrenden anzupassen und dabei einen möglichst konstanten Abstand einzuhalten. Da aber sowohl die Wahrnehmung der Geschwindigkeiten und Abstände als auch die motorische Fähigkeit der Fahrer nicht ausreichen, die Beschleunigung mit dem Fahrpedal einzustellen, schwankt der Abstand und es wird im Wechsel geringfügig schneller oder langsamer gefahren.

Der letzte Bereich ist der Bremsbereich. Wird ein kritischer Abstand unterschritten, bremsen die Fahrer, um einen Unfall zu vermeiden.

Für alle Bereiche gleich ist die Behandlung der Reaktionszeit. Die Reaktionszeit wird im Ursprungsmodell durch die Rechenschrittweite von einer Sekunde abgebildet. In diesem Bereich liegen die menschlichen Reaktionszeiten. Durch die Aktualisierung des Fahrerwunsches in jedem Zeitschritt wird die Reaktionszeit mit einer Sekunde festgelegt.

Da – wie beschrieben – die Wahrnehmungsschwellen geschwindigkeitsabhängig sind, kann ein typischer Annäherungsvorgang, der von veränderlichen Geschwindigkeiten geprägt ist, nur in einer dreidimensionalen Darstellung aufgezeigt werden. Abbildung 1-8 stellt einen solchen Verlauf für die Annäherung an ein konstant fahrendes Fahrzeug dar.

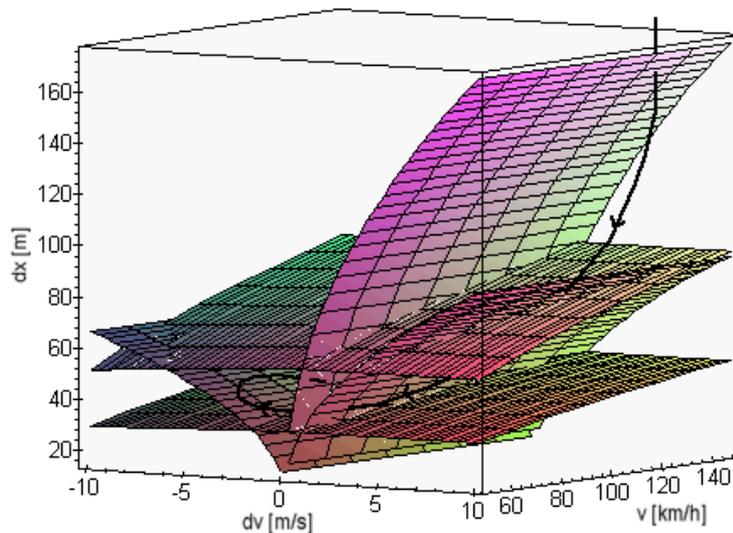


Abbildung 1-8: Annäherungs- und Folgevorgang

Zu beachten ist bei dieser Darstellung, dass der Folgebereich ebenso wie der Bremsbereich bei niedrigen Geschwindigkeit sehr klein werden kann.

Das Folgemodell nach Wiedemann stellt eine sehr gute Grundlage für die Beschreibung der längsdynamischen Fahrzeugführung im Straßenverkehr dar. Allerdings hat dieses Modell



Für einen Spurwechsel kann es eine Vielzahl von Beweggründen geben. Das Verfolgen einer bestimmten Route und das Überholen sind zwei wichtige Motivationen. Aber auch taktische Erwägungen führen zu einem Spurwechsel. Nähert sich ein schnelleres Fahrzeug von hinten, so kann dies unter Umständen einen Spurwechsel auf die rechte Spur motivieren. Um die Art und Zahl der abbildbaren Spurwechsellmotivationen flexibel zu halten, wurde in PELOPS eine Struktur für das Spurwechselmodell gewählt, bei der alle Beweggründe in einen Faktor münden. Ferner sollen verschiedene Fahrertypen auch im Spurwechselverhalten abgebildet werden können. Der Faktor, der die Spurwechsellmotivationen zusammenfasst, lässt sich als Zufriedenheit interpretieren. In jedem Zeitschritt wird diese Zufriedenheit für jeden Fahrer bestimmt. Einflussgrößen sind die fahrerindividuelle Wunschgeschwindigkeit im Vergleich zur aktuellen eigenen Geschwindigkeit und der Geschwindigkeit auf den Nachbarspuren. Das zu Beginn beschriebene schnellere Fahrzeug, das sich von hinten nähert, reduziert die Zufriedenheit auf der eigenen Spur und erhöht die Zufriedenheit auf der rechten Spur. Die Summierung der einzelnen Zufriedenheiten mündet in einen Wert, der die Gesamtsituation beschreibt. Die Zufriedenheit ist fahrerabhängig, da die Wunschgeschwindigkeit eine fahrerabhängige Größe ist.

Die Zufriedenheitswerte werden über der Zeit aufsummiert und mit einem Vergessensfaktor gewichtet, was einen hypothetischen Vergessensprozess simuliert, der in ähnlicher Weise beim Fahrer angenommen werden kann. Je länger die Fahrsituation zurückliegt, desto geringer ist der Einfluss auf das aktuelle Verhalten. Die Zufriedenheitswerte für die aktuelle Spur und die beiden Nachbarspuren werden miteinander verglichen. Dabei wird eine Hysterese berücksichtigt, um instabiles Spurwechselverhalten zu vermeiden. Instabiles Spurwechselverhalten zeigt sich z.B., wenn die Verkehrssituation auf allen Spuren annähernd identisch ist. Eine marginale Änderung auf der Nachbarspur würde zu einem Spurwechsel führen. Wird eine Hysterese eingeführt, so muss die Situation auf der Nachbarspur um den Wert der Hysterese besser sein, um beim Fahrer einen Spurwechselwunsch auszulösen. Ist die Situation über einen längeren Zeitraum geringfügig besser, so führt das Aufsummieren der Zufriedenheiten dazu, dass die Hystereseschwelle nach einer gewissen Zeit überschritten wird und der Fahrer die Spur wechseln will. Zur Umsetzung des Spurwechselwunsches wurde ein mehrstufiges Beschleunigungsverhalten mit dem Zielen auf eine Lücke realisiert. Es wird also zusätzlich zu der Querführung die Längsdynamik betrachtet. Dabei ist einem Spurwechselvorgang bereits eine Beschleunigungsphase vor dem Ausscheren zuzuordnen, wenn sie zum Erreichen einer geeigneten Lücke bzw. zur Geschwindigkeitsanpassung an die relevanten Fahrzeuge auf der Zielspur dient. Insgesamt wird also die herkömmliche Betrachtung des reinen Spurwechselvorgangs um das taktische Fahrerverhalten, beschrieben durch den Beschleunigungsverlauf, ergänzt [NEU03].

### 1.3.3 Fahrerabhängige Einflussgrößen

Fahrerabhängige Einflussgrößen für das Verhaltensmodell sind beispielsweise das Sicherheitsbedürfnis oder das Schätzvermögen von Abständen und Geschwindigkeiten. Durch diese Parameter ist es bereits möglich, verschiedene Fahrercharaktere (z.B. „sportlicher

Fahrer“) abzubilden. Das „Sicherheitsbedürfnis“ ist der wichtigste Parameter des Fahrermodells: Es beeinflusst alle abstandsabhängigen Verhaltensweisen. Ein hohes Sicherheitsbedürfnis bedeutet einen größeren Folgeabstand. Die Größe der Lücke auf der Nachbarspur, welche für einen Überhol- oder Spurwechsellvorgang erforderlich ist, steigt ebenfalls mit höherem Sicherheitsbedürfnis. Zusätzlich wird die Geschwindigkeitswahl beeinflusst. Die Parameter Schätzungsvermögen und Gaspedalsensibilität dienen als Modelleingangsgroßen zur Beschreibung von Unzulänglichkeiten des Fahrers bei der Einschätzung von Abständen bzw. Differenzgeschwindigkeiten und bei der Bedienung der Fahrzeugstellgrößen Gaspedal, Bremse und Lenkung. Reaktionszeiten werden für die vier Kategorien Normalfahrt, Reaktion auf potentiell gefährliche Bremsmanöver, Spurwechsel und Anfahren des Vorausfahrenden unterschieden. Zusätzlich verarbeitet das Fahrermodell individuelle Befolgungsgrade für Überholverbote (z.B. für das Rechtsüberholen).

Ein sportlicher Fahrer kann in der Simulation mit PELOPS beispielsweise durch ein niedriges Sicherheitsbedürfnis, gutes Schätzvermögen und hohe Gaspedalsensibilität beschrieben werden. Ein niedriges Sicherheitsbedürfnis bedeutet bei einem sportlichen Fahrer, dass grundsätzlich niedrigere Abstände gefahren werden und Lücken, die der Fahrer für seinen Spurwechsel nutzt, erheblich kleiner sind als bei einem durchschnittlichen Fahrer. Gleichzeitig ist der so parametrisierte sportliche Fahrer bereit, kleine Abstände und Lücken, die ihm durch den umgebenden Verkehr aufgeprägt werden, zu akzeptieren. Gutes Schätzvermögen und hohe Gaspedalsensibilität bedeuten in diesem Zusammenhang eine gute Kontrollierbarkeit der eigenen Aktionen. Diese beiden Parameter haben aber nur einen geringen Einfluss auf das modellierte Fahrverhalten und sind im Vergleich zum Sicherheitsbedürfnis nur wenig bedeutsam. Weiterhin wird der sportliche Fahrer durch eine entsprechende Parametrisierung der Größen „Reaktionszeit“ und „Befolgungsrate“ beschrieben. Seine Reaktionszeiten sind möglicherweise niedrig, ebenso seine Befolgungsrate für Geschwindigkeitsbeschränkungen (d.h. er fährt sehr viel schneller als erlaubt). Analog zu diesem Beispiel können andere „Fahrertypen“ (sicherheitsbetont, sparsam etc.) durch eine geeignete Wahl der Fahrerparameter „eingestellt“ werden. Insgesamt steht für die Simulation ein validierter Satz von mehreren hundert Standardfahrertypen in statistischer Verteilung zur Verfügung. Hierbei werden typische PKW-Fahrer ebenso abgedeckt, wie auch verschiedenste LKW-Fahrertypen [NEU03].

Nachfolgend sind die einzelnen Fahrerparameter beschrieben [HOC01b]:

- Wunschgeschwindigkeit ( $0 \dots \infty$ ):  
Die Wunschgeschwindigkeit beschreibt die Geschwindigkeit, die der Fahrer bei freier Fahrt auf freier Strecke ohne Geschwindigkeitsbeschränkung fahren möchte.
- Max. mögliche Verzögerung ( $0 \dots \infty$ ):  
Die maximal mögliche Verzögerung ist eine Begrenzung der negativen Beschleunigungswerte. Die Angabe erfolgt als Betragswert in  $\text{m/s}^2$ . Der physikalisch sinnvolle größte Werte liegt sicher nicht über der Erdbeschleunigung  $g$  ( $= 9,81\text{m/s}^2$ ).

- **Ausnutzung der Fzg.-Beschleunigung (0...1):**  
Die Ausnutzung der Fahrzeugbeschleunigung gibt an, wie viel Prozent der in der augenblicklichen Situation höchstens zu realisierenden Beschleunigung tatsächlich umgesetzt werden. Ist der Wert Null, so wird das Fahrzeug gar nicht beschleunigen. Die Angabe ist dimensionslos.
- **Sicherheitsbedürfnis (0...1):**  
Das Sicherheitsbedürfnis ist ein komplexer Fahrerparameter, dessen Einfluss sich am stärksten beim Abstandverhalten zeigt. Je größer das Sicherheitsbedürfnis, desto größer der Abstand. Ein Sicherheitsbedürfnis von 0,0 beschreibt einen extrem risikofreudigen Fahrer, wohingegen ein sehr vorsichtiger Fahrer mit einem Wert von 1,0 beschrieben wird. Die Angabe ist dimensionslos. Wiedemann [WIE74] gibt diesen Parameter als normalverteilt mit dem Mittelwert 0,5 und der Standardabweichung 0,15 an.
- **Schätzvermögen (0...1):**  
Das Schätzvermögen hat ebenfalls Einfluss auf viele Größen. Ein Schätzvermögen von Null bedeutet eine sehr schlechte Fähigkeit, die Position und Bewegung der Vorderfahrzeuge einzuschätzen, der Wert von 1,0 beschreibt eine sehr exakte Einschätzung der Aktionen der Vorderfahrzeuge. Die Angabe ist dimensionslos. Wiedemann [WIE74] gibt diesen Parameter als normalverteilt mit dem Mittelwert 0,5 und der Standardabweichung 0,15 an.
- **Gaspedalsensibilität (0...1):**  
Ein Wert von Null beschreibt eine sehr schlechte Beherrschung des Gaspedals, ein Wert von Eins hingegen bedeutet, dass der Fahrer sehr dosiert beschleunigen kann. Die Angabe ist dimensionslos. Wiedemann gibt diesen Parameter als normalverteilt mit dem Mittelwert 0,5 und der Standardabweichung 0,15 an.
- **Geschwindigkeitsbegr. – Befolgung (0...1):**  
Der Grad der Befolgung von Geschwindigkeitsbegrenzungen gibt an, um wie viel größere Geschwindigkeiten der Fahrer bereit ist zu fahren. Ein Wert von Null bedeutet, dass der Fahrer sich nicht an Geschwindigkeitsbeschränkungen hält, er fährt bis zu 1,5 mal so schnell (z.B. bis zu 180 km/h bei erlaubten 120 km/h). Ein Wert von Eins dagegen bedeutet die exakte Einhaltung aller Geschwindigkeitsbeschränkungen. Die Angabe ist dimensionslos.
- **Überholverbot – Befolgung (überholt links, überholt rechts, überholt re/li, befolgt alles):**  
Die Befolgung der Überholverbote ist weitgehend selbsterklärend. „überholt links“ bedeutet, dass der Fahrer trotz Verbot bereit ist, links zu überholen. „überholt re/li“ ist somit gleichbedeutend mit einem Fahrer, der sich an Überholverbote gar nicht hält. Die Angabe ist dimensionslos.
- **Max. Fußbremskraft (0... ∞):**  
Dieser Parameter wird nur bei der Simulation von Realfahrzeugen berücksichtigt. Die

maximale Fußbremskraft beschreibt die Kraft, die der Fahrer auf die Bremse ausüben kann. Die Angabe erfolgt in Newton. Als größter Wert für die maximale Fußbremskraft kann 500 angenommen werden, da sich in Untersuchungen zeigte, dass in Szenarien ohne Notbremsvorgänge bereits ab 200 Newton realistische Ergebnisse erzielt werden.

- Reglerkenngröße  $k_p$  (0...  $\infty$ ):  
Dieser Parameter wird nur bei der Simulation von Realfahrzeugen berücksichtigt. Die Umsetzung des Beschleunigungswunsches des Fahrers in eine Pedalstellung wird mittels eines PI-Gliedes modelliert.  $k_p$  gibt die Proportionalverstärkung an. Simulationen zeigen, dass  $k_p$  keine negativen Werte annehmen darf, da das Verhalten sonst instabil wird. Um nahe der Stabilitätsgrenze von Null zu bleiben, sollte dieser Wert 1,0 nicht übersteigen.
- Reglerkenngröße  $k_i$  (0...  $\infty$ ):  
Dieser Wert wird nur bei der Simulation von Realfahrzeugen berücksichtigt. Die Reglerkenngröße  $k_i$  beschreibt die Gewichtung des Integralanteils des PI-Gliedes. Simulationen zeigen, dass  $k_i$  keine negativen Werte annehmen darf, da das Verhalten sonst instabil wird. Um nahe der Stabilitätsgrenze von Null zu bleiben, sollte dieser Wert 1,0 nicht übersteigen.
- Max. Pedalverstellgeschwindigkeit (0...  $\infty$ ):  
Dieser Parameter wird nur bei der Simulation von Realfahrzeugen berücksichtigt. Die maximale Pedalverstellgeschwindigkeit beschreibt die Schnelligkeit, mit der ein Beschleunigungs- oder Verzögerungssprung realisiert werden kann. Der Wert Null bedeutet, dass die Pedalerie gar nicht verstellt wird. Änderungen in der Beschleunigung und damit der Geschwindigkeit sind auf das Schubmoment zurückzuführen. Die Angabe erfolgt in  $90^\circ/\text{s}$ .
- Normale Reaktionszeit (0...  $\infty$ ):  
Die Reaktionszeit ist in PELOPS als Ringspeicher realisiert. Als Reaktion auf die aktuelle Verkehrssituation wird eine Beschleunigung berechnet. Diese wird in den Ringspeicher geschrieben und solange darin behalten, bis die Reaktionszeit abgelaufen ist. Erst dann wird die Beschleunigung herausgelesen und im Handlungsmodell in Stellung der Aktuatorik umgesetzt. Die Reaktionszeit ändert also nicht das Fahrverhalten, sondern sie bedeutet eine Totzeit in der Reaktion auf die Verkehrssituation. Auf diese Weise erzeugt die Reaktionszeit natürlich indirekt ein anderes Verhalten, weil sich die Verkehrssituation – salopp formuliert – in einer Sekunde Nichtstun verändert hat. Die Angabe erfolgt in Sekunden.
- Reaktionszeit beim Bremsen (0...  $\infty$ ):  
Die Reaktionszeit beim Bremsen spielt nur dann eine Rolle, wenn sich der Fahrer in der Fahrsituation Bremsen befindet. Die Funktionsweise ist die gleiche, wie unter normaler Reaktionszeit beschrieben. Die Angabe erfolgt in Sekunden.

- Reaktionszeit bei Spurwechsel (0...  $\infty$ ):  
Die Reaktionszeit bei Spurwechsel spielt nur dann eine Rolle, wenn sich der Fahrer in der Fahrsituation Spurwechsel befindet. Die Funktionsweise ist die gleiche, wie unter normaler Reaktionszeit beschrieben. Die Angabe erfolgt in Sekunden.
- Reaktionszeit beim Anfahren (0...  $\infty$ ):  
Die Reaktionszeit beim Anfahren spielt nur eine Rolle, wenn sich der Fahrer in der Fahrsituation Anfahren befindet. Die Funktionsweise ist die gleiche, wie unter normaler Reaktionszeit beschrieben. Die Angabe erfolgt in Sekunden.
- Präferenzspur (0,1,2,3 ...  $\infty$ ):  
Die Präferenzspur beschreibt die bevorzugte Spur des Fahrers. Je nach der umgebenden Verkehrssituation verlässt der Fahrer diese Spur aber, z.B. um ein extrem langsameres Fahrzeug zu überholen. Er wird nach dem Überholmanöver auf seine Präferenzspur zurückkehren. Ein Wert von 0 bedeutet, dass der Fahrer keine bevorzugte Spur hat.

#### 1.4 Umweltmodell

Das Umweltmodell erlaubt bei Bedarf eine detaillierte Beschreibung der Einflüsse einer stationären Verkehrsumgebung. Sowohl der Verlauf der Straße in horizontaler und vertikaler Richtung über Radien und Klothoiden bzw. Steigungen, Gefälle und vertikale Ausrundungen, als auch die Anzahl und die Breite der Spuren wird angegeben. Zusätzlich zu diesen geometrischen Daten können Verkehrszeichen, Spurmarkierungen sowie Umweltbedingungen über Parameter wie etwa Nässe, Glätte und Sichtweite vorgegeben werden. Die aktuellen Verkehrsbedingungen für ein Fahrzeug ergeben sich dann aus der Anzahl der umgebenden Fahrzeuge sowie deren Abständen und Geschwindigkeiten. Um bestimmte Verhaltensweisen im Verkehr zu provozieren oder vorgegebene Fahrzyklen nachzufahren, können einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten wahlweise auch bestimmte Bewegungsprofile vorgegeben werden. Das Einsetzen der Fahrzeuge am Streckenbeginn kann sowohl anhand von makroskopischen (Verkehrsstärke, Durchschnittsgeschwindigkeit und prozentualer Lkw-Anteil je Spur) als auch von mikroskopischen (Fahrzeugart, Einsetzzeitpunkt, Geschwindigkeit und Spur je Fahrzeug) Verkehrsdaten erfolgen. Des Weiteren besteht auch die Möglichkeit, die Simulation als "endloses Band" durchzuführen, bei dem das Streckenende mit dem Streckenanfang verbunden ist.

#### 1.5 Hardware-in-the-Loop – Software-in-the-Loop

Seit [BRE04] ist es möglich, PELOPS als Rapid-Prototyping-Werkzeug in der Assistenzsystementwicklung einzusetzen. Somit ist es bei der Simulation neuer Systemkonzepte nicht mehr zwingend erforderlich, dass Algorithmen und Funktionen direkt als Quellcode in PELOPS eingebunden werden. Sowohl Hardwarekomponenten als auch Softwareprogramme können mit PELOPS in einer gekoppelten Simulation betrieben werden. Dazu stellt PELOPS als Schnittstellen eine Netzwerkanbindung, eine serielle Schnittstelle, über die

beispielsweise eine Kopplung mit dSpace-Hardware vorgenommen werden kann, sowie CAN-Bus zur Verfügung.

Die Durchführung von Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulationen verlangt generell nach einer Simulation in Echtzeit. Dies bedeutet, dass eine Zeiteinheit in der Simulation gleich lange andauert wie in der Realität. Dies ist notwendig, da die zu testenden Komponenten den gleichen Randbedingungen ausgesetzt werden müssen wie bei deren Einsatz in einem vollständig realen Umfeld. So zeigt sich beispielsweise, ob die Arbeitsgeschwindigkeit eines geprüften Steuergerätes für seine Aufgabenstellung ausreicht, die verwendete Datenübertragungsrate zwischen einzelnen Komponenten eines Systems hoch genug ist, oder mechanische Stellglieder in ausreichend kurzer Zeit präzise genug angesteuert werden können [BRE04].

Im Hardware-in-the-Loop Fall erfolgt die Synchronisierung von PELOPS mit einer realzeitlichen Bezugsgröße. Diese Bezugsgröße kann entweder durch den in jedem PC enthaltenen quartzgesteuerten Echtzeituhr-Baustein oder von einer an der Simulation beteiligten Komponente, die entsprechend ausgestattet ist, zur Verfügung gestellt werden. Bei einem externen Zeitbezug muss jedoch sichergestellt sein, dass der entsprechende Lieferant in der Lage ist, seine Zeitbasis zu kontrollieren und etwaige Fehler selbständig zu detektieren, da sonst die gesamte Simulation falsch ablaufen und die Ergebnisse verfälschen würde [BRE04].

Steht keine Komponente mit externer Echtzeitbasis zur Verfügung, verwendet die HiL-Variante von PELOPS den Uhrbaustein des PCs. Dieser Baustein ist autonom und daher unabhängig von der Rechenbelastung des Prozessors, so dass von einer konstanten Zeitbasis ausgegangen wird. Die Verwendung des Uhrbausteins als interne Zeitbasis wird unter anderem bei einer HiL-Simulation von PELOPS mit einem direkten Anschluss an den CAN-Bus notwendig. Da dieser Datenbus keine festen Zeitschlitze für jeden Busteilnehmer bietet, kann er nicht als verlässliche Quelle für eine Zeitbasis angenommen werden [BRE04].

Um fehlerhafte Ergebnisse zu vermeiden, wird die Simulation bei Verlassen der Echtzeit generell sofort abgebrochen und der Anwender über diesen Umstand informiert. Da dieser Fall in der Regel nur durch zu hohe Rechenbelastung eintritt, kann der Benutzer dann entweder sein Simulationsszenario etwas vereinfachen, oder die Rechenleistung der entsprechenden Komponente erhöhen. Bei einem PC für PELOPS kann dies beispielsweise durch das Stoppen gerade nicht notwendiger Prozesse erreicht werden [BRE04].

Im Gegensatz zur HiL-Simulation muss eine Software-in-the-Loop-Simulation in der Regel nicht in Echtzeit ablaufen, da die Zeitbasis der mit Daten zu versorgenden Software ebenfalls nicht in Echtzeit abläuft. Um die Konsistenz der Simulationsdaten zu gewährleisten, müssen in diesem Fall alle beteiligten Programme synchronisiert werden. Die notwendige Synchronisierung aller Teilnehmer wird an den Schnittstellen für den Datenaustausch vorgenommen, indem sowohl PELOPS als auch die angekoppelte Software immer beliebig lange auf die Daten des aktuellen Zeitschrittes der jeweils anderen Komponente warten. Zur Realisierung einer solchen Synchronisierung ist auf beiden Seiten eine einheitliche Zeitschrittweite bei der Berechnung bzw. an der Datenschnittstelle notwendig [BRE04].

### 1.6 Bedienung

Im Folgenden wird ein Überblick über die Bedienung von PELOPS gegeben. Detaillierte Erklärungen zur Bedienung sind in den PELOPS-Schulungsunterlagen zu finden.

Die bis hierher beschriebenen Modelle (Fahrermodell, Fahrzeugmodell und Umweltmodell) bilden den Berechnungskern ('Solver') von PELOPS. Die Berechnung läuft ohne einen Dialog mit dem Anwender ab, so dass sie auch in einer Stapelverarbeitung erfolgen kann. Um auf einfachem Wege eine Simulation zusammenstellen zu können, enthält PELOPS eine graphische Oberfläche, die den Dialog zum Anwender ermöglicht ('Pre-Prozess'). Da der Solver als Simulationsergebnis reine Zahlenkolonnen erzeugt, die dem Anwender keine direkte Beurteilung erlauben, stehen zusätzliche Programme zur Transformation und zur anschließenden Illustration bzw. Animation der Ergebnisse zur Verfügung ('Post-Prozesse'). Abbildung 1-10 verdeutlicht die Struktur des Programmsystems.



Abbildung 1-10: Struktur des Programmsystems PELOPS

Im Pre-Prozess kann der Anwender die Fahrer-Fahrzeug-Einheiten entweder einzeln aus Daten zusammensetzen, oder auf in der verfügbaren Bibliothek enthaltene Standarddatensätze einzelner Komponenten bzw. ganzer Einheiten zurückgreifen. Dasselbe gilt für den Steigungsverlauf, die Kurvigkeit und die Beschilderung einer Strecke. Um bei größeren Verkehrsszenarien die Eingabe der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten (FFE) zu vereinfachen, wurde ein FFE-Generator entwickelt, der anhand weniger Vorgaben (wie Anzahl zu erzeugender FFE, Lkw-Anteil, mittlere Geschwindigkeit, etc.) die Einzeldaten nach statistischen Randbedingungen verteilt. Mit Hilfe einer graphischen Ausgabe kann ein zusammengestelltes Szenario abschließend überprüft werden. Neben der Zusammensetzung des Simulationsszenarios sind im Pre-Prozess auch die Randbedingungen, wie z.B. die Simulationsdauer, die Zeitschrittweite der Berechnung und der Ausgabe etc. vorzugeben. Weiterhin können aus der Vielzahl möglicher Ergebnisdaten des Fahrzeugzustandes, des Fahrzustandes oder des Fahrerverhaltens diejenigen Daten ausgewählt werden, die für die Untersuchung wichtig sind.

Mit den verschiedenen Arten des Post-Prozessing besteht nach der Berechnung dann die Möglichkeit, die Ergebnisse statistisch, graphisch oder als Animation aufzuarbeiten. Mit der statistischen Verarbeitung können aus den Ergebnisdaten für einzelne Messquerschnitte Fundamentaldiagramme oder auch Häufigkeitsverteilungen der Geschwindigkeiten und Abstände erstellt werden. Dadurch besteht eine einfache Möglichkeit des Ergebnisvergleiches mit realen Messschleifen im Straßenverkehr. Die graphische Aufbereitung ermöglicht für die einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten beliebige Punkt- oder Liniendarstellungen der Ergebnisdaten. Als Animation steht mit dem 'Bird's Eye' eine Betrachtung von oben auf den Verkehrsablauf zur Verfügung. Seit [BRE04] ist es nun auch möglich, bereits während der Simulation eine dreidimensionale Animation aus der Fahrersicht eines vor Simulationsstart ausgewählten Referenzfahrzeugs zu betrachten.

## 2 Literatur

- [BEN01] BENMIMOUN, A.; BREUER, K.; NEUNZIG, D.  
Analyse der Potentiale von Assistenzsystemen mit Hilfe gekoppelter CAE-  
Entwicklungswerkzeuge  
19. VDI/VW Gemeinschaftstagung – Fahrzeugkonzepte für das 2. Jahrhundert  
Automobiltechnik,  
Wolfsburg, 2001
- [BEN03a] BENMIMOUN, A.; NEUNZIG, D.; WALLENTOWITZ, H.; MAAG, C.;  
KRÜGER, H.  
Effizienzsteigerung durch professionelles/partnerschaftliches Verhalten im Stra-  
ßenverkehr  
noch nicht veröffentlichter Abschlussbericht im Auftrag der Forschungsvereini-  
gung Automobiltechnik e.V. (FAT)  
Aachen/Würzburg, 2003
- [BEN03b] BENMIMOUN, A.  
Simulation des Fahrerverhaltens im Nebel  
nicht veröffentlichter Projektbericht des Instituts für Kraftfahrwesen der RWTH  
Aachen im Auftrag des Instituts für Psychologie der RWTH Aachen  
Aachen, 2003
- [BRE02] BREUER, K.; CHRISTEN, F.  
Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen unter Verwendung von SiL- und HiL-  
Techniken im Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS  
11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2002  
Aachen, 2002
- [BRE04] BREUER, K.  
Verkehrsflusssimulation zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen  
Dissertation am Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen in Vorbereitung  
Aachen, 2004
- [DIE95] DIEKAMP, R.  
Entwicklung eines fahrzeugorientierten Verkehrsflusssimulationsprogramms  
Dissertation am Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen  
Aachen, 1995
- [EHM02] EHMANN, D.  
Modellierung des taktischen Fahrerverhaltens bei Spurwechselforgängen  
Dissertation am Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen  
Aachen, 2002

- [GIP86] GIPPS, P.G.  
A Model for the Structure of Lane-Changing Decisions  
Transportation Research B, Vol 20B, No5, pp 403-414  
1986
- [HID99] HIDAS, P.; BEHBAHANIZAGDEH, K  
Microscopic Simulation of Lane Changing under Incident Conditions  
14th Int. Symp. on Transportation and Traffic Theory  
Jerusalem, 1999
- [HOC01a] HOCHSTÄDTER, A.; EHMANN, D.; BREUER, K.  
Das PELOPS Fahrermodell  
Interner technischer Bericht der Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen  
für die BMW AG.  
Aachen, 2001
- [HOC01b] HOCHSTÄDTER, A.  
Analyse der Fahrerparameter  
Interner technischer Bericht der Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen  
für die BMW AG.  
Aachen, 2001
- [LUD89] LUDMANN, J.  
Konzept eines Verkehrssimulationsprogramms  
Diplomarbeit am Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen  
Aachen, 1989
- [LUD98] LUDMANN, J.  
Beeinflussung des Verkehrsablaufs auf Straßen – Analyse mit dem fahrzeu-  
gorientierten Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS  
Dissertation am Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen  
Aachen, 1998
- [MAA03] MAAG, C.; KRÜGER, H.; BREUER, K.; BENMOMOUN, A.; NEUNZIG, D.; EH-  
MANN, D.  
Aggressionen im Straßenverkehr  
Heft M151 der Bundesanstalt für Straßenwesen  
Bergisch Gladbach, 2003
- [NEU03] NEUNZIG, D.  
Interner Bericht zum PELOPS-Fahrermodell  
Aachen, 2003

- [SPA78] SPARMANN, U.  
Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen  
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 263. Hrsg. Bundesministerium für Verkehr  
1978
- [THE97] THEIS, C.  
Modellierung des Fahrverhaltens an Autobahnanschlussstellen  
Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Karlsruhe  
Karlsruhe 1997
- [WAL00] WALLENTOWITZ, H.  
Vertikal-/Querdynamik von Kraftfahrzeugen  
Vorlesungsumdruck Fahrzeugtechnik II  
Institut für Kraftfahrwesen Aachen  
Aachen, 2000
- [WEI99] WEILKES, M.  
Auslegung und Analyse von Fahrerassistenzsystemen mittels Simulation  
Dissertation am Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen  
Aachen, 1999
- [WIE74] WIEDEMANN, R.  
Simulation des Straßenverkehrsflusses  
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Band 8  
Karlsruhe 1974