

Ein Ansatz zur Analyse der Gangwahl für die Optimierung von Schaltstrategien

An approach to analyse the gear selection for the optimization of shifting strategies

Ralf Schuler, Michael Bargende, Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart

Karl-Ludwig Krieger, DaimlerChrysler AG, Stuttgart

Zusammenfassung

Bei der automatischen Gangwahl in Nutzfahrzeugen mit automatisierten Schaltgetrieben entsprechen nicht alle Schaltungen den Erwartungen des Fahrers. Um diese Diskrepanz genauer zu untersuchen wurde ein Messsystem realisiert, welches neben den Fahrzeugdaten und den Daten externer Sensorik auch eine Beschreibung der aktuellen Verkehrssituation aufzeichnet. Aus den so gewonnenen Messdaten werden die Schaltpunkte und alle die Gangwahl beeinflussenden Attribute extrahiert. Die Schaltpunkte können anschließend grafisch dargestellt werden. Die Diagramme sind allerdings stets auf wenige Dimensionen beschränkt, wodurch eine Analyse der Gangwahl nicht im Detail möglich ist. Aus diesem Grund wurden fortgeschrittene Analysemethoden angewendet. Sie ermöglichen eine statistische Auswertung des Schaltverhaltens und die Beurteilung verschiedener Einflüsse auf die Gangwahl. Die Ergebnisse werden in der Form von quantitativen Assoziationsregeln und Bayes'schen Netzen generiert. Damit ist es möglich, die Gangwahl objektiv zu bewerten und unterschiedliche Schaltstrategien zu vergleichen. In Verbindung mit den zusätzlichen Informationen aus dem Messsystem ist es weiterhin möglich Optimierungspotenzial hinsichtlich der Gangwahl aufzuzeigen, indem deutlich wird, in welcher Fahr- bzw. Verkehrssituation der Fahrer manuell eingreift.

Summary

The automatic gear selection in commercial vehicles with automated manual transmissions does not always meet the drivers expectations. To analyse this discrepancy a measurement system was designed, which enables the recording of vehicle data together with data from additional sensors and information on relevant traffic situations. Shifting points and all interesting attributes, which might influence the gear selection are extracted from the measurement data. This data can partly be visualized in diagrams, however, since the diagrams are restricted to a few dimensions the gear selection can not be analysed in detail. On this ground advanced data analysis methods are applied, which result in association rules and Bayesian networks. They enable a statistically description and evaluation of the gear selection. With this, it is possible to analyse the gear selection in quantity and compare different shifting strategies. Together with driving and traffic situation information from the measurement system it is possible to point out the optimisation potential of shifting strategies.

1. Einleitung und Motivation

Automatisierte Schaltgetriebe (ASG) haben sich in den letzten Jahren im Kraftfahrzeug etabliert. Sie weisen gegenüber konventionellen Automatikgetrieben ein geringes Gewicht, einen hohen Wirkungsgrad und geringere Kosten auf. Bei den Personenkraftwagen werden sie deshalb in Hochleistungs-, Eco- und Low-Cost-Automatikkonzepten eingesetzt [1]. In schweren Nutzfahrzeugen hat sich eine Automatisierung erst mit den automatisierten Schaltgetriebe durchgesetzt. Mittlerweile sind ASG das Standard Automatisierungskonzept und zählen größtenteils zur Serienausstattung.

Ein wesentlicher Bestandteil der automatisierten Schaltgetriebe ist die Schaltstrategie, welche automatisch einen geeigneten Gang wählt und die Schaltung initiiert. Insbesondere bei schweren Nutzfahrzeugen, welche in der Regel eine Vielzahl von Gängen, ein geringes Leistungsgewicht und ein kleines nutzbares Motordrehzahlband aufweisen, trägt die automatische Gangwahl zu einer höheren Wirtschaftlichkeit und zu einem größeren Fahrkomfort bzw. zu einer gesteigerten Gesamtsicherheit bei, da sie den Fahrer von Routineaufgaben entlastet. Heutige Schaltstrategien ermöglichen dabei Verbrauchswerte und Durchschnittsgeschwindigkeiten, die mit denen eines geübten Fahrers vergleichbar sind (siehe Abb. 1).

	EAS		manual	
	L/100km	km/h	L/100km	km/h
Hill 1	75,0	73,7	76,5	75,0
Hill 2	99,4	46,7	100,6	47,7
Hill 3	242,6	25,0	246,8	24,1
Hill 4	338,2	19,0	330,9	18,3
Average	115,6	49,1	116,8	49,0

Abb. 1: *Comparison of manual and automated shifting in a Mercedes-Benz Actros 1843 truck with EAS shifting [2]*

Trotz dieser Vorteile entsprechen Schaltungen bzw. Schaltzeitpunkte nicht in jedem Fall den Erwartungen des Fahrers. Um diese Diskrepanz genauer zu analysieren wurde die Gangwahl in Nutzfahrzeugen untersucht. Hierfür wurde ein Messsystem und eine durchgängige, automatisierte Datenauswertung realisiert, welche eine objektive Analyse der automatischen, wie auch der manuellen Gangwahl ermöglicht. Dies kann zum einen dazu verwendet werden, unterschiedliche Schaltstrategien im Entwicklungsstadium oder im Rahmen eines Benchmarks zu vergleichen. Desweiteren wird durch diesen Ansatz ggf. Optimierungspotential bestehender Schaltstrategien aufgezeigt, indem ersichtlich wird, in welchen Fahr- bzw. Verkehrssituationen der Fahrer manuell eingegriffen hat und damit seine Unzufriedenheit mit dem automatisch gewählten Gang äußert. Letztlich ist diese Datenauswertung auch ein Hilfsmittel, um Anforderungen an die Gangwahl im Hinblick auf unterschiedlichste Einsatzzwecke der Nutzfahrzeuge (Baustelle, Verteilerverkehr, Fernverkehr, Müllfahrzeug) zu spezifizieren und mit diesen Informationen einen hohen Kommunalitätsgrad der Schaltstrategie zu erreichen.

Nach der Erläuterung einiger grundlegender Aspekte für die automatische Gangwahl wird im Folgenden das Messsystem und die Methoden der Datenauswertung vorgestellt. Weiterhin werden einige Ergebnisse der Untersuchung des Schaltverhalten in Nutzfahrzeugen und Möglichkeiten für eine zukünftige Optimierung aufgezeigt.

2. Grundlagen der Gangwahl

2.1 Fahrzeuglängsdynamik

Das Getriebe dient dazu den Verbrennungsmotor in günstigen Bereichen zu betreiben. Der Betriebspunkt ergibt sich dabei aus der Betrachtung der Fahrzeuglängsdynamik. In Anlehnung an [3] gilt:

$$Z = F_R + F_L + F_{St} + F_B + F_K + B \quad (1)$$

mit der Summe der Zugkräfte an j Achsen:

$$Z = \sum_{j=1}^n \frac{M_{R,j}}{r_j} \quad (2)$$

den Rollwiderständen des Fahrzeugs:

$$F_R = \sum_{j=1}^n f_{R,j} F_{z,j} \quad (3)$$

dem Luftwiderstand (bei Anströmwinkel $\neq 0$):

$$F_L = c_x A \frac{\rho}{2} v_r^2 \quad (4)$$

dem Steigungswiderstand:

$$F_{St} = G \sin \alpha = mg \sin \alpha \quad (5)$$

dem Beschleunigungswiderstand (bei Schlupf):

$$F_B = \left(m + \sum_{j=1}^n \frac{J_{R,j}}{r_j R_j} \right) \ddot{x} \quad (6)$$

und dem Kurven- oder Krümmungswiderstand F_K , welcher den Anteil der Seitenkräfte in Fahrzeuglängsrichtung bei Kurvenfahrt beschreibt und bei Nutzfahrzeugen mit mehreren Achsen einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an den Fahrwiderständen aufweist:

$$F_K = \sum_{j=1}^n f_j \sin \alpha_j \approx f_K G \quad (7)$$

sowie den Bremskräften B , die sich aus den Anteilen der Betriebsbremse B_V , B_H und den Anteilen der Dauerbremsen B_M , B_{DR} zusammensetzen:

$$B = B_V + B_H + B_M + B_{DR} \quad (8)$$

Die Dauerbremsen entlasten die Betriebsbremse bei längeren Gefällefahrten. In einigen Nutzfahrzeugen werden neben den Motorbremsen (Auspuffklappe und Konstantdrossel, B_M) auch Retarder (B_{DR}) verbaut [4]. Retarder sind hydrodynamische oder Wirbelstrombremsen. Je nachdem ob diese vor oder nach dem Getriebe eingebaut sind, spricht man von Primär- oder Sekundär-Retardern. Im Falle eines Sekundär-Retarders wird (8) zu:

$$B = B_V + B_H + \frac{i_{G,s} i_A}{\eta_{G,s} \eta_A} F_M + \frac{i_A}{\eta_A} F_{DR} \quad (9)$$

Für ein heckangetriebenes Zugfahrzeug mit Stufengetriebe gilt unter Berücksichtigung der Getriebewirkungsgrade für die Zugkraft aus (2):

$$Z = \eta_{G,s} \eta_A M_M \cdot \frac{i_{G,s} i_A}{r} \quad (10)$$

Die Zusammenhänge aus den Gleichungen (1-9) können teilweise noch vereinfacht werden. Außerdem ist auch eine Leistungsbetrachtung üblich. Dann gilt mit (10) und (1) bei Berücksichtigung von Schlupf:

$$\eta_{G,s} \eta_A M_M \omega_M = (F_R + F_L + F_{St} + F_B + F_K + B) \frac{r}{R} v \quad (11)$$

Bei der Vernachlässigung von Schlupf ($S=0$) wird in (11) der Quotient $r/R \approx 1$. Ist der Triebstrang geschlossen, beschreibt Gleichung (11) wegen

$$\omega_M = i_{G,s} i_A \frac{I}{R_0 (1-S)} v \quad (12)$$

den Zusammenhang zwischen Leistungsbedarf (rechte Seite) und Leistungsangebot (linke Seite) und legt somit den momentanen Betriebspunkt des Verbrennungsmotors fest (siehe 2.2.2).

2.2 Automatisierungsmöglichkeiten

2.2.1 Schaltkennlinien

In konventionellen Automatikgetrieben und einigen automatisierten Schaltgetrieben wird die Gangwahl durch Schaltkennlinien gesteuert [5]. Die Lage der Schaltkennlinien wird dabei im Motorkennfeld so festgelegt, dass sie vor allem Bereiche günstigen Kraftstoffverbrauches einschließen und bei starker Fahrpedalbetätigung hohe Motorleistungen ermöglichen (siehe Abb. 2).

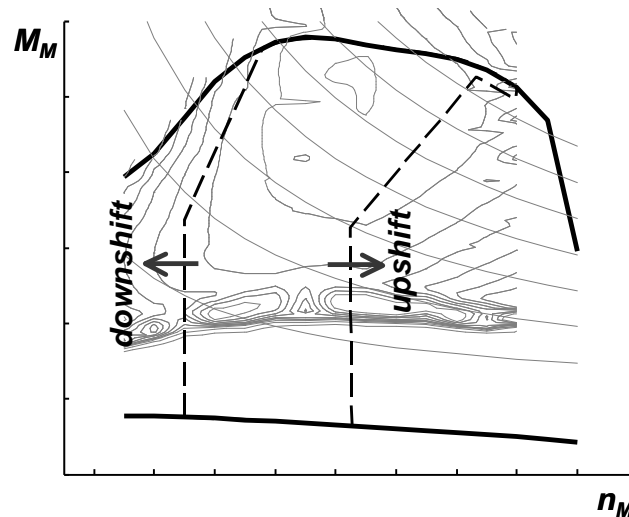


Abb. 2: *Principle of shifting characteristic lines for the automated gear selection*

Die Lage und Form der Schaltkennlinien wird dabei unterschiedlichen Fahrsituation angepasst [6,7]. Hierfür sind eine Vielzahl von Parametern notwendig. In einigen Getriebesteuerungen erfolgt eine Adaption an den Fahrertyp bzw. die Fahrweise [8,9]. Schaltkennlinien führen in der Regel zu sequentiellen Schaltungen und haben sich für Fahrzeuge mit wenigen Gängen bewährt. In schweren Nutzfahrzeugen sind jedoch meist Schaltungen erforderlich, bei denen Gänge übersprungen werden. Dies erfordert eine Automatisierung mit mehr Freiheitsgraden, wie sie durch Schaltkennlinien gegeben sind.

2.2.2 Schaltkriterien

Die Zusammenhänge aus Gleichung (11) lassen sich anschaulich im Motorkennfeld erläutern. In Abb. 3 sind drei mögliche Betriebspunkte A , B und C eingezeichnet. Die fett gezeichnete Kurve entspricht der Volllastlinie des Motors. Die einzelnen (nahezu) geraden Linien der dünn gezeichneten Linienschar entsprechen der Summe der Fahrwiderstände aus den Gleichungen (3-5) in den einzelnen Gängen. Die dünn gezeichnete Linienschar von gekrümmten Linien entspricht den stündlichen Kraftstoffverbräuchen. Die gestrichelt gezeichnete Linie ist die Linie minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs.

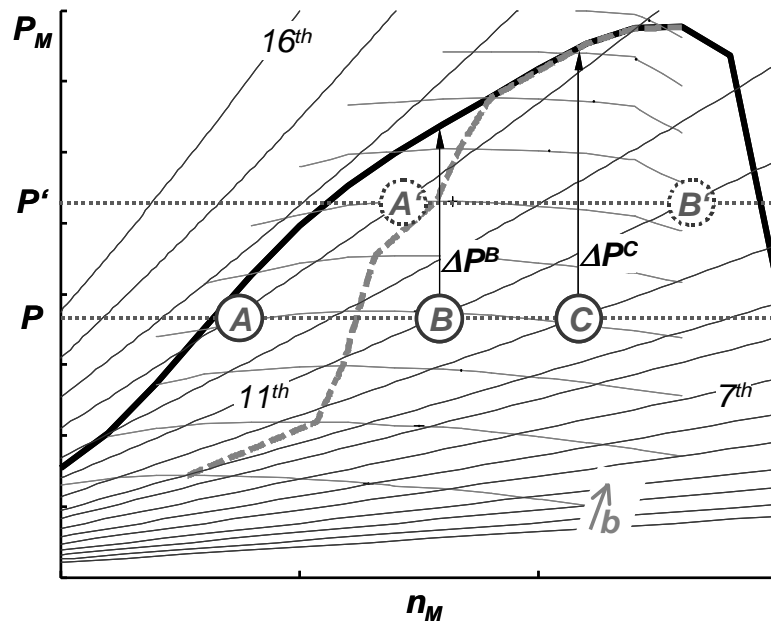


Abb. 3: Operation point characteristics in the engine map of a truck equipped with a 16 gear transmission at road slope of 5%

Es sei zunächst angenommen, dass die drei Betriebspunkte jeweils stationäre Betriebspunkte sind, d.h. die vom Motor abgegebene Leistung P ist gerade so groß, dass keine Beschleunigung auftritt ($F_B=0$). Die Betriebspunkte unterscheiden sich zum einen durch unterschiedliche Leistungsreserven ΔP und unterschiedliche Kraftstoffverbräuche b . Wird nun über das Fahrpedal eine Leistung P' eingefordert, beschleunigt das Fahrzeug ($F_B>0$). Ausgehend vom Punkt C kann sich im 10. Gang kein neuer stationärer Betriebspunkt einstellen, da vorher die Abregeldrehzahl des Motors erreicht wird. In diesem Fall ist eine drehzahlbedingte Zughochschaltung erforderlich. Ausgehend vom Punkt B kann eine Beschleunigung entlang der Fahrwiderstandslinie des 11. Ganges bis B' stattfinden. Der Kraftstoffverbrauch in B' ist jedoch ungünstig, so dass eine verbrauchsbedingte Zughochschaltung in den Punkt A' nahe der Linie minimalen Kraftstoffverbrauchs sinnvoll ist. Ausgehend vom Punkt A ist im 13. Gang ebenfalls eine Beschleunigung nach A' möglich. Da die Leistungsreserve in A jedoch sehr gering ist, wird der Beschleunigungsvorgang insgesamt langsamer ablaufen als von Punkt B aus. Erhöht sich zudem die Fahrbahnsteigung, wird die Linienschar der Fahrwiderstände aufgefächert und Punkt A wandert in Richtung der Volllastlinie. Dann ist keine Beschleunigung mehr möglich und eine leistungsbedingte Zugrückschaltung ist erforderlich.

Ähnliche Überlegungen lassen sich auch für den Schubbetrieb anstellen, so dass sich zusammenfassend die Kriterien aus Abb. 4 verwenden lassen, um die Gangwahl zu steuern [10,11]. Entsprechend des Fahrerwunsches und des Fahrzustandes ist eine situationsabhängige Anpassung dieser Schaltkriterien erforderlich.

	<i>Upshift</i>	<i>Downshift</i>
<i>Propulsion</i>	<i>n, b</i>	ΔP
<i>Trailing throttle</i>	<i>(n)</i>	<i>n, ΔP</i>

Abb. 4: *Possible criteria to control shifting in automated transmissions*

Die Schaltkriterien werden zum einen dazu verwendet, die Schaltung auszulösen, zum anderen kann damit aber auch das Zielgebiet für den neuen Gang festgelegt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass eine Festlegung der Zielgebiete durch konkurrierende Kriterien zu Schaltpendelungen führen kann.

2.3 Fahrerwunsch

Ein zentraler Aspekt bei der automatischen Gangwahl ist die Berücksichtigung des Fahrerwunsches. Der Fahrer drückt seinen Wunsch mit Hilfe des Wählhebels, der Betriebs- und Dauerbremse, des Fahrpedals und des Lenkrades aus (siehe Abb. 5). Über den Wählhebel erfolgt neben der Fahrtrichtungsvorgabe auch ein manueller Eingriff, falls der Fahrer einen anderen als den automatisch gewählten Gang bevorzugt. Die Motorbremse und der Retarder sind kombiniert und z.B. beim Mercedes-Benz Actros über einen Hebel mit 5 Stufen einstellbar.

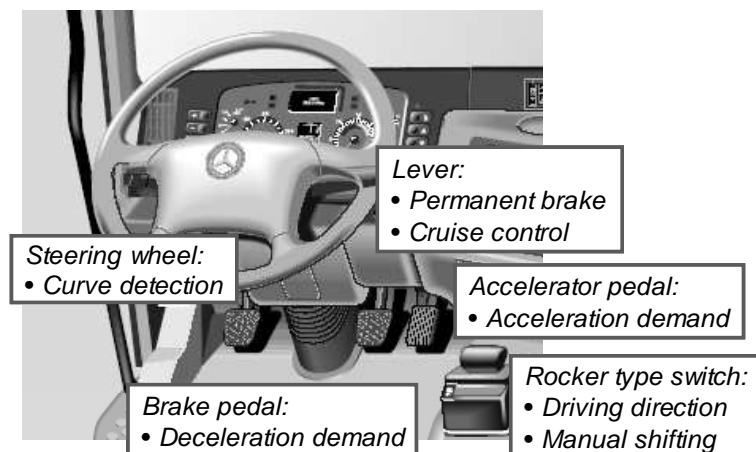


Abb. 5: *Human-machine-interfaces in a Mercedes-Benz Actros to detect the drivers intentions*

Mit Hilfe des Fahrpedals signalisiert der Fahrer seinen Beschleunigungswunsch. Dabei kann das Fahrpedal als Motormoment, als Nabenmoment oder als Nabenleistung interpretiert sein. Entspricht das Fahrpedal einem Soll-Motormoment, so ergeben sich innerhalb der Drehzahlgrenzen des Motors – je nach gewähltem Gang – unterschiedliche stationäre Betriebspunkte bei unterschiedlichen Motordrehzahlen bzw. Fahrzeuggeschwindigkeiten. Die Interpretation als Nabenmoment oder Nabenleistung ermöglicht hingegen bei einer Fahrpedaländerung die Abschätzung einer neuen stationären Geschwindigkeit und somit die Prognose eines

Zielganges [10]. Diese Kenntnis kann wiederum zur Beeinflussung von Gangfolgen genutzt werden. Ohne genaue Kenntnis der vielfältigen Motorsteuerungsfunktionen, welche der Fahrpedalbetätigung überlagert sind, gestaltet es sich in der Praxis allerdings als schwierig, auf das der jeweiligen Fahrpedalstellung entsprechende Ist-Motormoment zu schließen. Eine Abschätzung des zukünftigen stationären Betriebspunktes ist somit ebenfalls schwierig [12]. Darum ist es für die Gangwahl in den meisten Fällen zweckmäßig die Fahrpedalstellung nur relativ, als kontinuierlichen Wunsch nach mehr, der gleichen oder weniger Leistung, zu interpretieren [5]. Eine weitere Informationsquelle steht bei Tempomatbetrieb zur Verfügung. Dann ist die Zielgeschwindigkeit vom Fahrer direkt vorgegeben und ein verbrauchsgünstiger stationärer Zielgang kann für die momentan wirkenden Fahrwiderstände ermittelt werden. Dies ermöglicht bei Beschleunigungsvorgängen die Realisierung angepasster Gangfolgen.

3. Messdatenerfassung und Datenvorverarbeitung

3.1 Messsystem und Datenkonvertierung

Um die Zusammenhänge zwischen Fahrerwunsch, Fahrsituation und automatischer Gangwahl umfassend zu analysieren, wurde ein Messsystem aufgebaut, mit dessen Hilfe schaltungsrelevante Daten aufgezeichnet werden können (siehe Abb. 6). Mit den aufgezeichneten Daten soll es einerseits möglich sein, Schaltpunkte zu quantifizieren um die automatische Gangwahl objektiv beurteilen zu können. Andererseits soll durch die Messdaten ggf. Optimierungspotenzial aufgezeigt werden. Es werden deshalb neben den Daten, welche den momentanen Fahrzustand und den Fahrerwunsch beschreiben, auch zusätzliche Informationen aufgezeichnet, die es ermöglichen die vorausliegende Strecke und die momentane Verkehrssituation mit zu berücksichtigen [13].

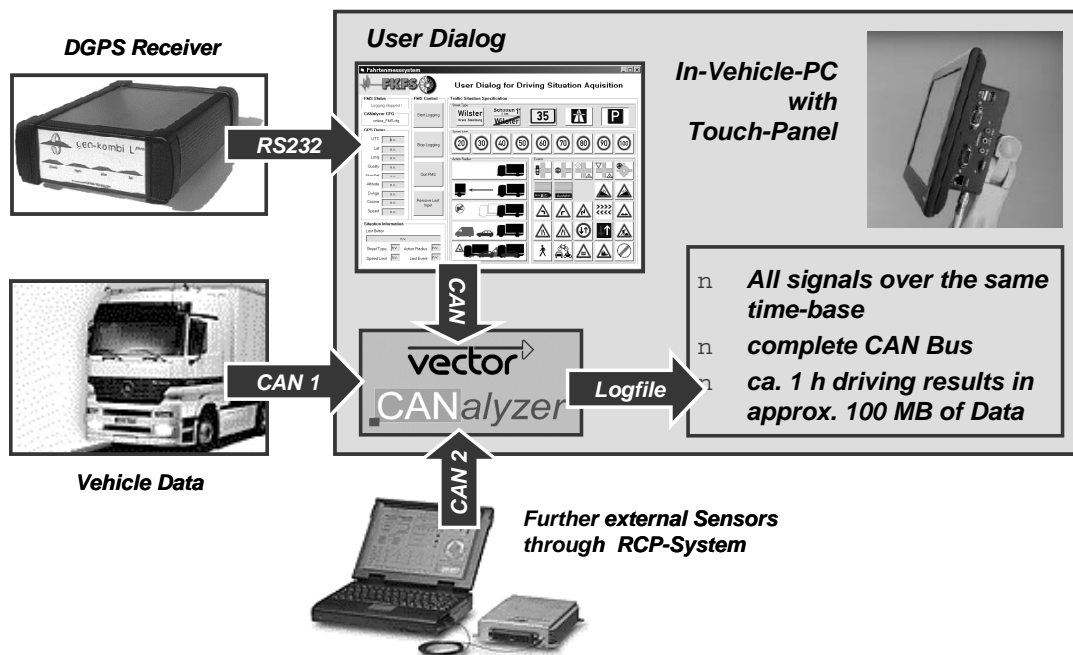


Abb. 6: Measurement system to record shifting relevant data

Die Daten werden zunächst aus Speicherplatzgründen in einem binären Datenformat aufgezeichnet und anschließend Skript-gesteuert nach Matlab® konvertiert [13]. Diese Konvertierung ist automatisiert und kann deshalb für beliebig viele Messfahrten erfolgen. In Matlab® liegen die Daten dann als Matrizen vor, wobei für jeden CAN-Identifizier eine Matrix erstellt wird. Die zusätzlichen Informationen vom DGPS-Empfänger und vom Beifahrerdialog werden dabei als zusätzliche CAN-Identifizier erstellt.

3.2 Auffinden von Schaltpunkten

In Matlab® werden aus den Identifizier-Matrizen die Schaltpunkte aufgesucht und alle schaltungsrelevanten Daten extrahiert. Um die Schaltpunkte aufzusuchen, muss bekannt sein, welche CAN Signale den Ablauf des Schaltvorganges steuern (siehe Abb.7 und Abb. 8). Für den im Nutzfahrzeugbereich weit verbreiteten J1939 Standard sind diese bekannt, bei proprietären Systemen ist die Zusammenarbeit mit dem OEM unabdingbar. Desweiteren müssen auch unterschiedliche Getriebetypen mit unterschiedlich ablaufenden Schaltvorgängen berücksichtigt werden.

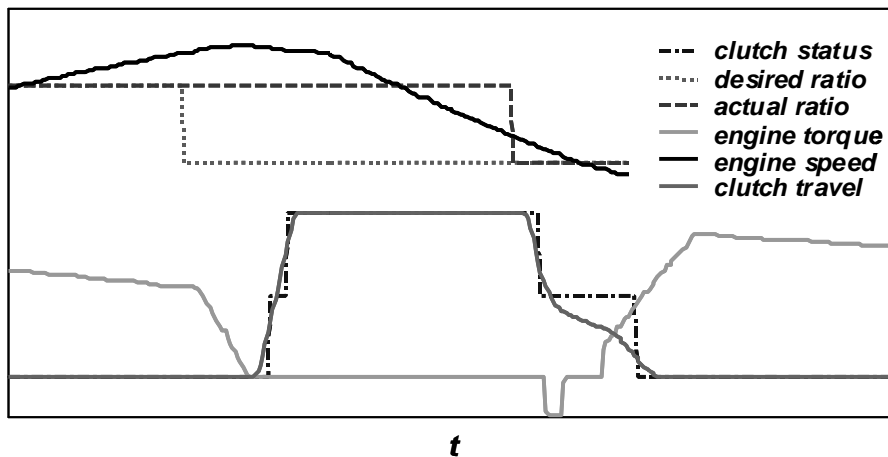


Abb. 7: Qualitative signal sequence for an upshift process in a synchronized gearbox (proprietary communication matrix)

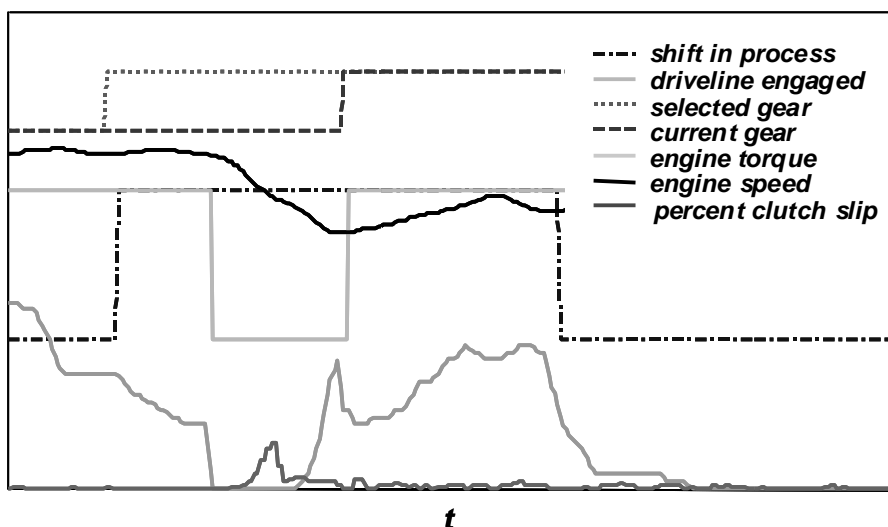


Abb. 8: Qualitative signal sequence for an upshift process in an gearbox with dog clutch (J1939 communication matrix)

3.3 Ermittlung relevanter Fahrzeug- und Streckenparameter

Zur Berechnung der Fahrwiderstände in den Gleichungen (3-6) sind Fahrzeugparameter notwendig. Diese sind nicht immer bekannt oder nicht immer zuverlässig. Die Fahrzeuggesamtmasse wird auf einer Waage ermittelt. Die Trägheitsmomente der rotierenden Massen sind entweder aus Messungen an den einzelnen Aggregaten bekannt oder müssen geschätzt (Drehmassenzuschlagsfaktor λ) bzw. den Konstruktionszeichnungen entnommen werden.

Aufgrund der unterschiedlichsten Nutzfahrzeugvarianten unterliegt der Roll- und Luftwiderstand starken Schwankungen. Abhängig vom Fahrzeugaufbau ergeben sich beispielsweise nach [3] c_w -Werte zwischen 0,6 und 1,0. Abhängig vom Anströmwinkel können sich ebenfalls Streuungen im Bereich von 1,0-1,5 für das Verhältnis von c_x/c_w ergeben. Es ist deshalb sinnvoll Roll- und Luftwiderstand durch einen Polynomansatz zusammenzufassen und die Koeffizienten jeweils mittels Ausrollmessungen zu ermitteln.

$$F_R + F_L = a_1 v + a_2 v^2 + a_4 v^4 \quad (13)$$

$$v = v_0 - \int_0^t \ddot{x} dt \Leftrightarrow v_0 - v = \frac{I}{m_0} \int_0^t (a_1 v + a_2 v^2 + a_4 v^4) dt \quad (14)$$

Gleichung (14) kann auch in Matrizenform geschrieben werden als:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{a} \quad (15)$$

darin sind \mathbf{Y} und \mathbf{X} aus den Ausrollmessungen bekannt:

$$\mathbf{Y} = v_0 - v \quad \text{der Vektor des Geschwindigkeitsabfalls}$$

$$\mathbf{X} = \frac{I}{m} \begin{bmatrix} \int_0^t v dt & \int_0^t v^2 dt & \int_0^t v^4 dt \end{bmatrix} \quad \text{eine Matrix der Geschwindigkeiten}$$

Den Koeffizientenvektor \mathbf{a} erhält man dann mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate aus [14]:

$$\mathbf{a} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (16)$$

Ein Schätzwert für die Fahrbahnsteigung liegt entweder als Signal auf dem CAN Bus des Fahrzeugs vor oder muss anderweitig ermittelt werden. Dies kann durch Messung z.B. mit einem Beschleunigungssensor oder durch eine Parameteridentifikation erfolgen.

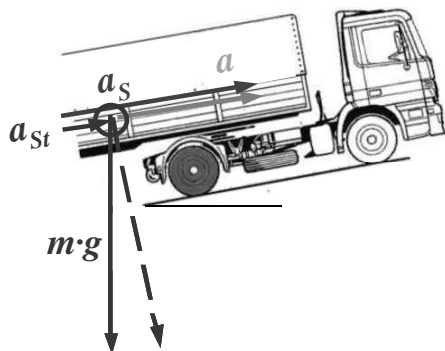


Abb. 9: Measurement of road slope with an acceleration sensor

Als Beschleunigungssensor kann z.B. ein Standard ESP-Sensor verwendet werden. Die Fahrbahnsteigung ergibt sich dann nach Abb. 9. zu:

$$\sin \alpha = \frac{a_s - a}{g} = \frac{a_s - \ddot{x}}{g} \quad (17)$$

wobei a_s die vom Sensor gemessene Absolutbeschleunigung darstellt. Dabei entstehen je nach Einbaulage des Sensors mehr oder weniger starke Fehler durch die Nickschwingungen des Fahrzeuges beim Anfahren, Bremsen und bei Lastwechsel. Diese müssen geeignet gefiltert werden.

Eine Identifikation der Steigung kann, wie in Abb. 10 dargestellt, in Anlehnung an einen Beobachter sowohl online, wie auch offline erfolgen. Hierfür ist ein Modell der Fahrzeuglängsdynamik notwendig, welches im wesentlichen wiederum aus Gleichung (1) – allerdings ohne Berücksichtigung des Steigungswiderstandes – besteht. Das Modell muss zusätzlich noch ein Feder-Masse-System aufweisen, welches die Verspannung des Antriebsstranges abbildet. Eine Differenz zwischen der fiktiven Geschwindigkeit v' und der gemessenen Geschwindigkeit v wird dann solange zurückgeführt, bis $v'=v$ gilt. Die Rückführung entspricht der Steigung α . Als Übertragungsfunktion $G(z)$ weist ein P-Verhalten bereits gute Ergebnisse auf.

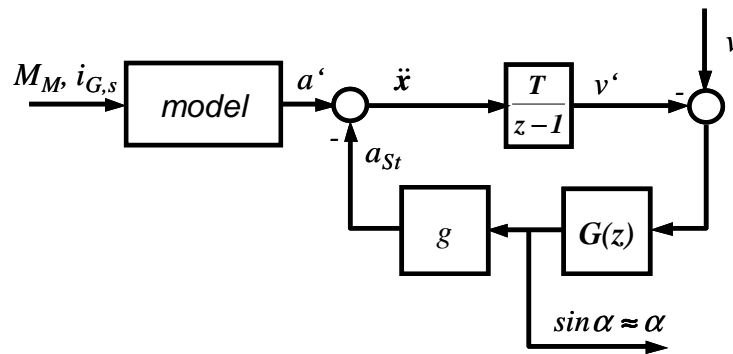


Abb. 10: *Observer based road-slope estimation*

Im Falle einer Steigungsbestimmung nach Abb. 10 werden alle nicht im Detail erfassten Fahrwiderstände aus Gleichung (1) als Steigung interpretiert. Es ist deshalb u.a. darauf zu achten, dass eine Steigungsbestimmung bei Schaltvorgängen oder Bremsvorgängen mit unbekanntem Bremsmoment nicht durchgeführt wird.

4. Grafische Analyse

Die aus den Messfahrten aufgesuchten Schaltpunkte lassen sich grafisch darstellen und analysieren. Abb. 11 zeigt die Schaltpunkte aus zwei Messfahrten im Motor-kennfeld (siehe Kap. 2.2.2).

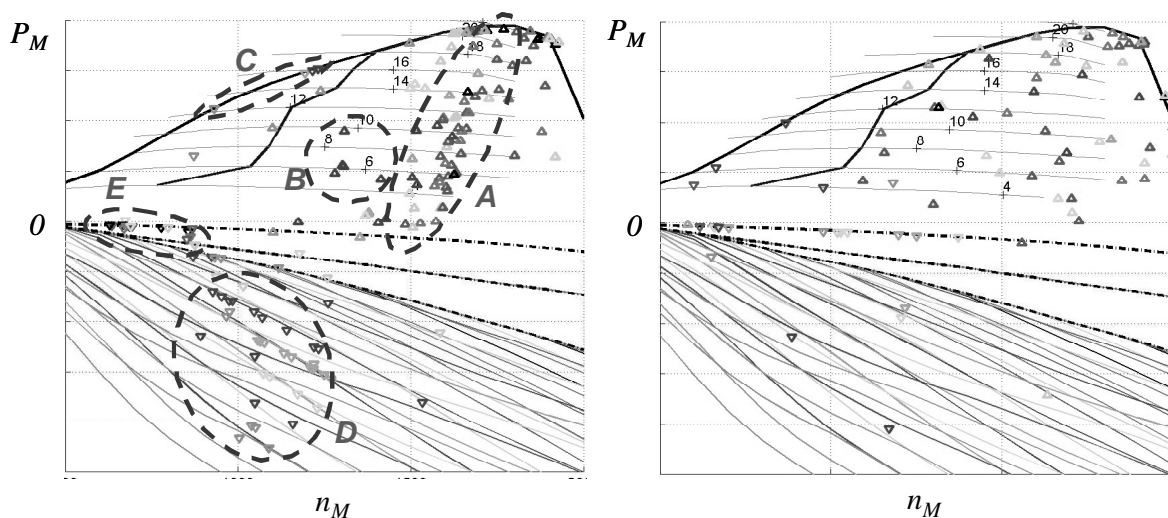


Abb. 11: *Shifting points from two test drives on the same round track of about 30 km. Left side shows automatically chosen shifting points, right side shows manually chosen shifting points.*

Die Linienschar im Schubbetrieb entspricht dabei nach Gleichung (9) den einzelnen Stufen der Dauerbremsen in unterschiedlichen Gängen. Schaltpunkte sind als Dreiecke dargestellt. Für Hochschaltungen zeigen die Dreiecke nach oben, für Rückschaltungen nach unten. Es wurde bei den dargestellten Testfahrten 105 mal manuell und 183 mal automatisch geschaltet. Die manuellen Schaltpunkte sind in Abb. 11 über das ganze Motorkennfeld gestreut und beinhalten demzufolge Optimierungspotenzial. Die automatischen Schaltungen hingegen stellen einen Kompromiss zwischen Verbrauchsreduktion und Fahrkomfort dar. Sie lassen sich im Wesentlichen in drehzahlbedingte Hochschaltungen (A), verbrauchsbedingte Hochschaltungen (B), zugkraftbedingte Rückschaltungen (C), Schubrückschaltungen (D) und Ausrollschaltungen (E) gruppieren.

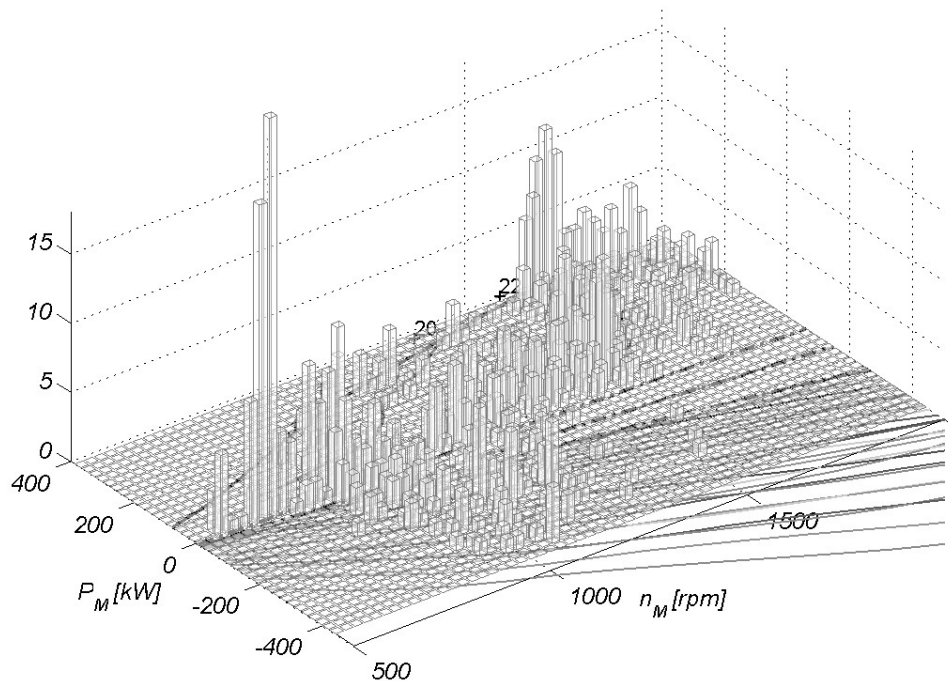


Abb. 12: 2d-Histogram of shifting points

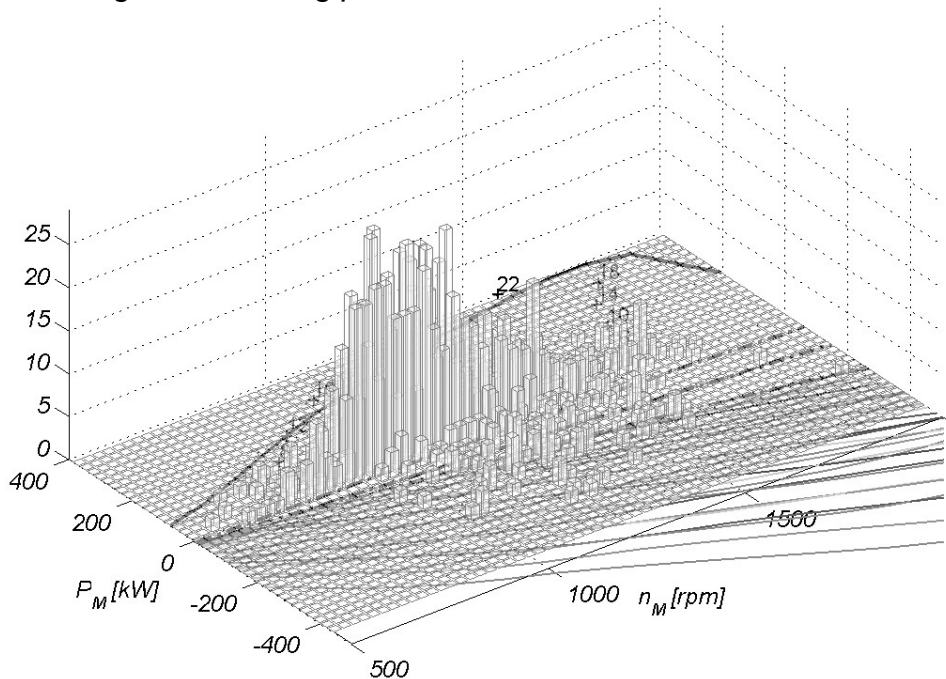


Abb. 13: 2d-Histogram of target points

Vergleichbare Zusammenhänge lassen sich auch über mehrere Messfahrten aufzeigen. Abb. 12 und 13 zeigen jeweils 1000 automatische Schaltungen, die sich aus Fahrten auf unterschiedlichen Strecken mit unterschiedlicher Beladung ergeben. In Abb. 12 sind die Häufigkeiten für P - n -Wertepaare dargestellt, bei denen eine Schaltung ausgelöst wird. In Abb. 13 sind diejenigen P - n -Wertepaare dargestellt, die sich unmittelbar nach einer Schaltung, d.h. als Zielpunkt ergeben.

Um die Unterschiede im Schaltverhalten infolge unterschiedlicher Beladung und Fahrstrecke grafisch weiter aufzuschlüsseln, müssten Schalt- und Zielpunkthäufigkeiten jeweils für einzelne vergleichbare Fahr- bzw. Verkehrssituationen dargestellt werden. Die Erzeugung und Auswertung derartiger Diagramme ist mit nicht unerheblichem Aufwand verbunden. Desweiteren sind Diagramme in ihrem Informationsgehalt stets auf wenige Dimensionen beschränkt und es ist meist nur möglich das Auftreten von „Ausreißern“ aufzuzeigen, nicht aber deren Zustandekommen zu erklären. Aus diesem Grund sind fortgeschrittene Analysemethoden notwendig.

5. Fortgeschrittene Analysemethoden

5.1 Grundlagen

Bei der Analyse der Gangwahl handelt es sich um die Identifikation eines komplexen nichtlinearen Systems. Schaltkriterien werden kontinuierlich oder sprunghaft an unterschiedliche Fahrsituationen angepasst. Da trotz der Datenerfassung mit einem in 3.1 erläuterten Messsystem nicht alle Eingangsgrößen im Detail erfasst werden können und die Reaktionen auf gleiche Eingangsgrößen (insbesondere bei manueller Gangwahl) streuen, ist das System von Unsicherheiten überlagert.

Vergleichbare Fragestellungen werden beispielsweise auch bei der Wissensentdeckung in Datenbanken untersucht. Die dort angewandten Methoden orientieren sich an Expertensystemen und an Methoden der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens. Abb. 14 zeigt den Prozess der Wissensentdeckung in Datenbanken und dessen Anwendung auf die Messdaten zur Analyse der Gangwahl.

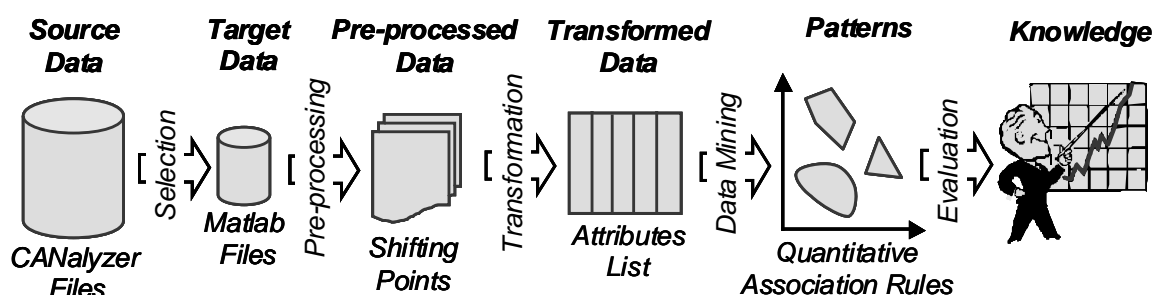


Abb. 14: Complete process of knowledge discovery in the measurement data

Die Schaltpunkte und zugehörige schaltungsrelevante Merkmale werden, wie in 3.2 erläutert, aus Sequenzen aufgesucht und in einzelne Schaltpunktstabellen geschrieben [13]. Für eine Auswertung über mehrere Messfahrten müssen alle Schaltpunktstabellen zu einer Liste mit sog. Attributen zusammengefasst werden. Bei dieser Transformation sind ggf. Umrechnungen notwendig. In der Attributliste wird nach Mustern gesucht. Dieser Schritt wird auch als Data-Mining bezeichnet. Für das Data-Mining stehen diverse Methoden und Algorithmen zu Verfügung.

5.2 Assoziationsregeln

Eine geeignete Beschreibung für die Zusammenhänge bei der Gangwahl sind quantitative Assoziationsregeln. Algorithmen und Methoden zur Suche von Assoziationsregeln wurden erstmals 1993 für die Warenkorbanalyse zur Untersuchung des Kundenverhaltens angewendet. In den letzten Jahren finden sie auch zunehmend für technische Fragestellungen Anwendung.

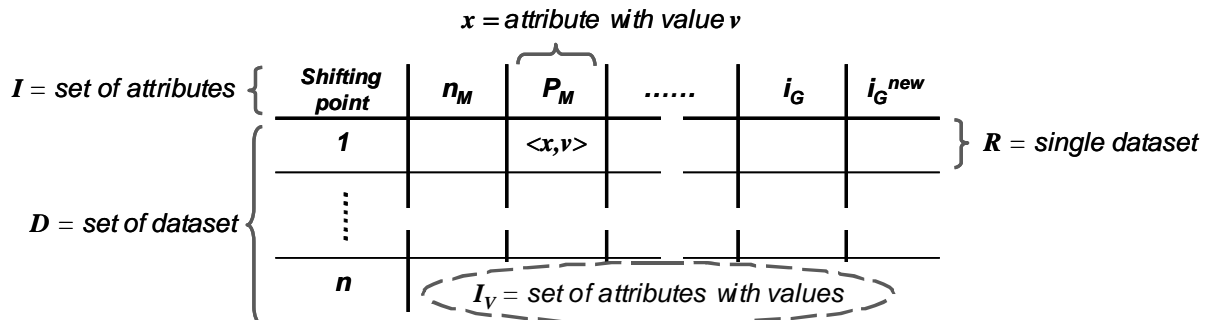


Abb. 15: Terminology for the explanation of quantitative association rules

Die Tabelle mit allen Schaltpunkten besteht aus einer Menge von schaltungsrelevanten Attributen I (siehe Abb. 15). Aus den Messfahrten entsteht die Menge D von Datensätzen. Jeder einzelne Datensatz $R \in D$ wird durch eine Menge von Attribut-Wertepaaren I_V repräsentiert, d.h. $R \subseteq I_V$, wobei jedes Attribut höchstens einmal vorkommt. Die Tabelle ist anschließend zu diskretisieren, d.h. geringfügig voneinander abweichende Werte müssen innerhalb von festzulegenden Intervallen auf den gleichen Zahlenwert gesetzt werden. Man erhält dann aus I_V eine Menge $I_R = \{ \langle x, u, o \rangle \in I \mid u \leq o \}$, wobei $\langle x, u, o \rangle$ für ein Attribut x in einem Intervall $[u \dots o]$ steht.

Es wird nach [15] definiert:

- Eine quantitative Assoziationsregel ist eine Implikation der Form $X \Rightarrow Y$. Dabei sind X und Y Teilmengen (sog. quantitative Itemsets) von I_R , die keine Attribute gemeinsam haben.
- Der Support einer Menge X bzw. Y in D wird definiert als der Prozentsatz der Datensätze in D , die X bzw. Y unterstützen. Ein Datensatz R unterstützt $X \subseteq I_R$ bzw. $Y \subseteq I_R$ wenn es zu jedem $\langle x, u, o \rangle \in X$ bzw. $\langle x, u, o \rangle \in Y$ ein Paar $\langle x, v \rangle \in R$ gibt. Der Support s einer quantitativen Assoziationsregel $X \Rightarrow Y$ in D ist dann der Support der Menge $X \cup Y$ in D .
- Die Konfidenz c einer quantitativen Assoziationsregel $X \Rightarrow Y$ in D wird definiert als der Prozentsatz der Datensätze, die in der Teilmenge aller Datensätze, welche X unterstützen, auch die Menge Y unterstützen.

Die Suche nach Assoziationsregeln besteht nun darin, in allen Datensätzen die interessanten quantitativen Assoziationsregeln mit Support $s > s_{min}$ und Konfidenz $c > c_{min}$ zu finden. Hierfür existieren diverse Algorithmen [16,17]. Eine Mögliche Assoziationsregel lautet beispielsweise:

$$\langle n_M: 1500-1700 \text{ U/min} \rangle \text{ und } \langle P_M: 300-400 \text{ KW} \rangle \Rightarrow \langle \#Gang: +2 \rangle, s=27\%, c=54\%$$

Wegen der Angaben Support und Konfidenz beschreiben die Assoziationsregeln unsicheres Wissen.

Konventionelle Algorithmen suchen nach allen möglichen Zusammenhängen in der Tabelle. Die rechte und linke Seite der Implikation $X \Rightarrow Y$ ergeben sich dabei anhand der Datensätzen und der Benutzervorgaben von s_{min} und c_{min} . Dies führt dazu, dass bei der Analyse der Gangwahl irrelevante Assoziationsregeln gefunden werden. Auch bei redundanten Informationen in der Tabelle ist dies der Fall. Stehen dort z.B. die Einträge Motordrehzahl n_M , Motormoment M_M und Motorleistung P_M , so muss sich selbstverständlich auch eine Assoziationsregel ergeben, die $P_M = M_M \omega_M$ erfüllt.

Für die Anwendung der konventionellen Algorithmen müssen die Itemsets lexikografisch sortiert sein. Desweiteren entspricht die Diskretisierung von I_V nach I_R einer Erweiterung der Spaltenzahl der Tabelle. Für jedes Intervall ergibt sich eine Spalte und die kategorischen bzw. numerischen Attribut-Werte-Paare werden zu booleschen Attribut-Werte-Paaren. Beides erhöht den Vorbereitungsaufwand und verringert die Übersichtlichkeit.

Unter Berücksichtigung des Hintergrundwissens aus 2 können deshalb auch einfachere bzw. abgewandelte Algorithmen eingesetzt werden. Für die Analyse des Schaltverhaltens ist die „rechte Seite“ der Implikation $X \Rightarrow Y$ bereits vorgegeben. In der Regel sind dies die Zielgebiete nach der Schaltung oder die Zielübersetzungen. Die „linke Seite“ sind dann die möglichen Einflüsse auf die Zielgebiete. Es ist deshalb durch Suchen und Sortieren in der Tabelle ebenfalls möglich Assoziationsregeln zu finden. Dabei sind die Attribute, deren Einfluss auf die rechte Seite untersucht werden soll, und die Attribute, welche die rechte Seite bilden, jeweils manuell auszuwählen.

5.3 Bayes'sche Netze

Eine weitere Darstellungsmöglichkeit für die Zusammenhänge bei der Gangwahl sind Bayes'sche Netze. Ein Bayes'sches Netz ist ein azyklischer, gerichteter Graph. Dieser besteht aus Knoten und Kanten. Knoten repräsentieren Variablen mit einer endlichen Anzahl von Zuständen bzw. reellwertige Funktionen. Die Knoten sind durch Kanten miteinander verbunden, welche die Richtung der Abhängigkeit andeuten. Entlang der Kanten kann nicht wieder zum Ausgangsknoten zurückgekehrt werden. Abb. 16 zeigt ein Beispiel für ein einfaches Bayes'sches Netz mit einem konvergenten Knoten. Anhand dieses Beispiels soll die Anwendung der Bayes'schen Formel erklärt werden. (Weitere Grundlagen zu Bayes'schen-Netzen siehe z.B. [19,20]).

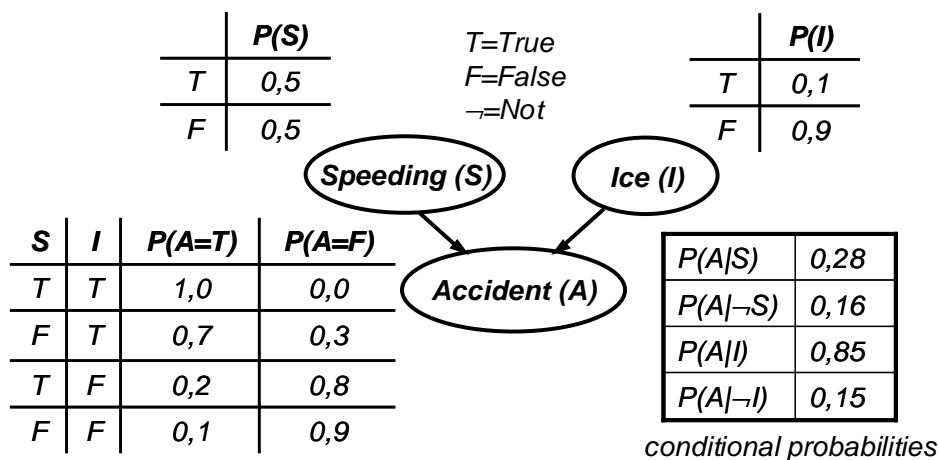


Abb. 16: Example for a Bayesian network with conditional probability tables for the variables [18]

Laut Abb. 16 kann ein Unfall entweder aufgrund zu schnellen Fahrens oder aufgrund glatter Strassen entstehen. Die bedingten Wahrscheinlichkeiten geben die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Unfalls an, wenn bekannt ist, ob zu schnell gefahren wurde oder die Strassen vereist waren.

Die Bayes'sche Formel erlaubt es diese Angaben umzukehren. Anhand der bereits bekannten bedingten Wahrscheinlichkeiten ergibt sich z.B. für die Wahrscheinlichkeit das im Falle eines Unfalls zu schnellen Fahrens die Unfallursache war:

$$P(S/A) = \frac{P(A/S) \cdot P(S)}{P(A/S) \cdot P(S) + P(A/\neg S) \cdot P(\neg S)} = \frac{0,28 \cdot 0,5}{0,28 \cdot 0,5 + 0,16 \cdot 0,5} = 0,63$$

Zur Analyse des Schaltverhaltens lassen sich derartige Zusammenhänge ebenfalls nutzen. Die Struktur des Bayes'schen Netzes wird dabei vorgegeben. Die bedingten Wahrscheinlichkeiten werden aus den Messdaten ermittelt. Für die Berechnung der Wahrscheinlichkeiten und des Bayes'schen Netzes hat sich die Matlab[®]-Toolbox von K. P. Murphy als sehr nützlich erwiesen [21].

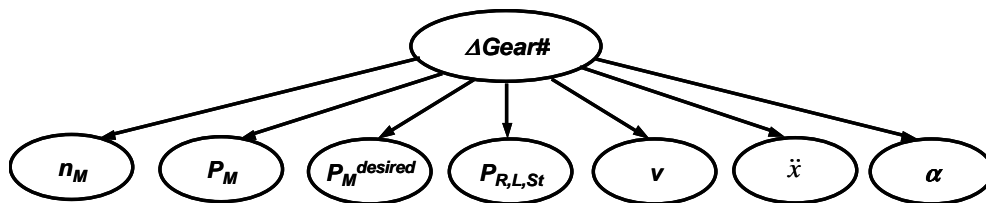


Abb. 17: Naive Bayesian network structure to analyse the gear selection

Für erste Untersuchungen zur Schaltpunktanalyse wurde das naive Bayes'sche Netz aus Abb. 17 verwendet. Anhand der Daten in der Schaltpunkttable wurden die bedingten Wahrscheinlichkeiten für die Variablen Motordrehzahl n_M , Motorleistung P_M , gewünschte Motorleistung (Fahrpedal) $P_M^{desired}$, Fahrwiderstandsleistung $P_{R,L,St}$, Fahrzeuggeschwindigkeit v , Fahrzeugbeschleunigung \ddot{x} und Fahrbahnsteigung α angelernt. Die Diagramme in Abb. 18 zeigen jeweils für drei Testfahrten die Anwendung des Netzes zur Vorhersage des gewählten Ganges. Dabei bedeutet die „0“ auf der x-Achse, das der wirklich geschaltete Gang getroffen wurde, eine „1“ besagt das die Vorhersage einen Gang höher lag, usw. Das linke Diagramm zeigt die Anwendung des Netzes auf die Daten, mit denen das Netz trainiert wurde. Im rechten Diagramm wurde das Netz auf „unbekannte“ Daten angewendet.

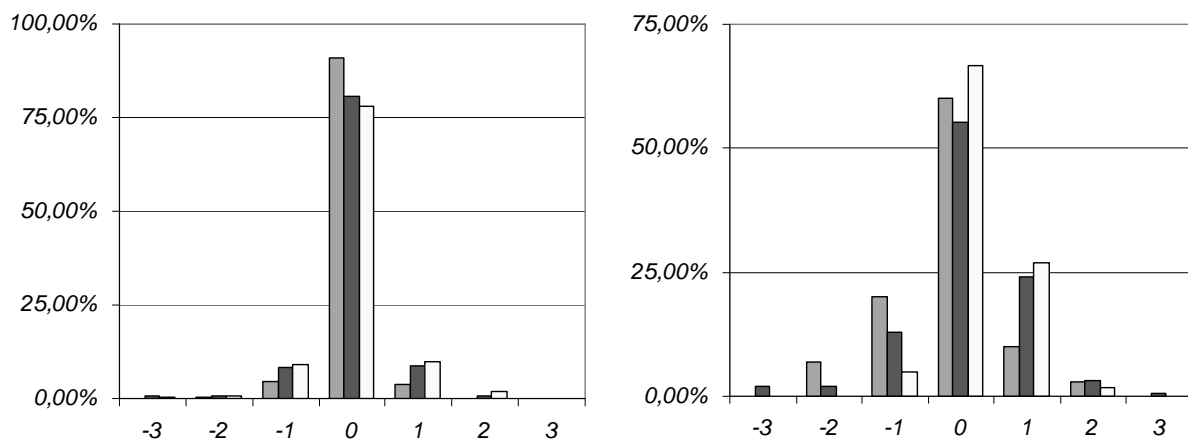


Abb. 18: Results of the naive Bayesian network

6. Bewertung und Ausblick

Für die beschriebenen Analysen sind mindestens 3000 Schaltungen erforderlich. Diese können beispielsweise in einem einwöchigen Dauerlauf gemessen werden. Ausreißer durch Fehler in den CAN-Signalen oder Fehler beim Aufsuchen der Schaltpunkte aus den Sequenzen müssen im Vorfeld aus der Tabelle entfernt werden. Der Aufwand zur Aufbereitung der Daten und Durchführung der Analysen ist nicht unerheblich. Aus diesem Grund ist eine Automatisierung z.B. durch Malab[®] Skripte erstrebenswert. Dies ist jedoch erst möglich, wenn ein fundiertes Problemverständnis vorliegt. So haben beispielsweise die Größe der Intervalle bei der Diskretisierung (welche im Übrigen auch für die Erstellung der Bayes'schen Netze notwendig ist) einen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Zunächst sind deshalb die vorgestellten Analysemethoden iterative Prozesse, in die manuell eingegriffen werden muss. Eine weitere wichtige Fragestellung ist die Wahl der Attribute beim Auffinden der Assoziationsregeln bzw. die Wahl der Variablen bei der Erstellung der Bayes'schen Netze. Für die ersten Versuche kann auf die Ergebnisse der grafischen Analyse zurückgegriffen werden. Im Weiteren muss allerdings auch hier iterativ eine gute Auswahl getroffen werden. Die Auswahl ist dann gut, wenn sich ein hoher Prozentsatz der Schaltungen mit den gewählten Attributen/Variablen beschreiben lässt. Für das Bayes'sche Netz ist voraussichtlich eine von Abb. 17 abweichende Struktur sinnvoll, da nicht alle Variablen unabhängig voneinander sind. Beispielsweise erfolgt bei der automatischen Gangwahl in der Regel eine Anpassung der Schaltdrehzahlen in Abhängigkeit von der Motorlast.

Mit den fortgeschrittenen Methoden der Datenanalyse erhält man aus gemessenen Schaltpunkten eine objektive Beschreibung des Schaltverhaltens. Dadurch ist eine Quantifizierung der Gangwahl und ein Vergleich unterschiedlicher Schaltstrategien möglich. Dies kann sowohl im Entwicklungsstadium wie auch im Rahmen eines Benchmark nützlich sein. Beim Vergleich müssen allerdings ggf. unterschiedliche Motorcharakteristika berücksichtigt werden. Dies kann durch die Kennzahlen für Momenten- und Drehzahlelastizität erfolgen [4]. Unterschiedliche Getriebeübersetzungen und Fahrzeugparameter gehen in die Bestimmung des Betriebspunktes ein und werden somit bereits berücksichtigt. Um die Ergebnisse der Auswertungen ebenfalls direkt miteinander vergleichen zu können, ist möglicherweise eine dimensionslose Betrachtung der Gleichung (1) bzw. (11) sinnvoll.

Durch eine explizite Analyse der Fahrereingriffe ist es weiterhin möglich Optimierungspotenzial aufzuzeigen. Der Fahrer greift üblicherweise dann ein, wenn der automatisch gewählte Gang nicht seinen Erwartungen entspricht. Dies ist in der Regel dann der Fall, wenn die automatische Gangwahl nicht über die gleichen Informationen wie der Fahrer verfügt. Derartige Fahrsituationen ergeben sich im Nutzfahrzeug z.B. beim Einfahren in eine Steigung, vor Bergkuppen oder bei Überholvorgängen am Berg. Durch die Auswertung des Fahrereingriffes erhält man eine Spezifikation für die Gangwahl in diesen Fahr- bzw. Verkehrssituationen. In Zukunft werden durch Synergien mit Fahrerassistenzsystemen der dritten Generation einige dieser Situationen auch von der automatischen Gangwahl berücksichtigt werden können. In einem Fahrzeug mit Abstandsregeltempomat und Spurhalteassistent können beispielsweise die Überholmanöver am Berg erkannt werden. Eine entsprechende Anpassung der Schaltkriterien wäre dann bereits durch die Datenauswertung spezifiziert.

Literatur

- [1] E. Eggert, M. Link, R. Nasdal, B. Voß, Möglichkeiten und Grenzen automatisierter Schaltgetriebe in Serienfahrzeugen, 18. Verkehrswissenschaftliche Tage Dresden, 2001
- [2] M. Kern, Gewusst wie. Doppeltest: Actros Schaltautomatik gegen manuelle Schaltung, Lastauto Omnibus, 75 (1998), Nr. 1
- [3] M. Mitschke, Dynamik der Kraftfahrzeuge – Band A: Antrieb und Bremsung, Springer Verlag, 1982
- [4] G. Lechner, H. Naunheimer, Fahrzeuggetriebe, Springer Verlag, 1994
- [5] H. J. Förster, Automatische Fahrzeuggetriebe, Springer Verlag, 1991
- [6] G. Willmerding, B. Dietzel, T. Körner, Rechnergestützte Entwicklung von Schaltprogrammen für Automatikgetriebe, 3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, expert Verlag, 1999
- [7] F. Tinschert, G. Wagner, R. Wüst, Arbeitsweise und Beeinflussungsmöglichkeiten von Schaltprogrammen automatischer Fahrzeuggetriebe, VDI Tagung Getriebe in Kraftfahrzeugen, VDI Verlag, 1995
- [8] O. Nelles, IntelligenTip®: A Learning Driving Strategy for Automated Transmissions, SAE World Congress, Detroit, Michigan, 2003
- [9] R. Kischkat, A. Koenig, Einsatz neuronaler Netze zur Verbesserung der Fahrstrategie bei Automatikfahrzeugen, 2. Symposium Steuerungssysteme für den Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen, Berlin, 1999
- [10] D. Hötzer, Entwicklung einer Schaltstrategie für einen PKW mit automatisiertem Schaltgetriebe, Universität Stuttgart, Dissertation, expert Verlag, 1999
- [11] R. Nasdal, B. Voß, Universelle Übersetzungswahlstrategie, Automobiltechnische Zeitschrift, 104 (2002), Nr. 7-8
- [12] G. Gilz, A. Wokan, Elektronisches Gaspedal für Nutzfahrzeuge, Automobiltechnische Zeitschrift, 95 (1993), Nr. 2
- [13] R. Schuler, M. Bargende, K.-L. Krieger, Situation-related recording and investigation of vehicle data for the development of situation adaptive shifting strategies, FISITA World Automotive Congress, Barcelona, 2004
- [14] R. Isermann, Identifikation dynamischer Systeme – Band I, Springer Verlag, 1988
- [15] M. Ester, J. Sander, Knowledge Discovery in Databases, Springer Verlag, 2000
- [16] R. Argawal, R. Srikant, Fast Algorithms for Mining Association Rules, 20. International Conference Very Large Data Bases, Morgan-Kaufmann Verlag, 1994
- [17] J.-M. Adamo, Data Mining for Association Rules and Sequential Patterns, Springer Verlag, 2001
- [18] A. Vähning, Anwendung von Bayes'schen Netzen zur Analyse der Gangwahl in schweren Nutzfahrzeugen, Studienarbeit am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart, 2004
- [19] K. P. Murphy, An introduction to graphical models, URL: http://www.ai.mit.edu/~murphyk/Papers/intro_gm.pdf, 2001
- [20] F. V. Jensen, Bayesian Networks and Decision Graphs, Springer Verlag, 2001
- [21] K. P. Murphy, Bayes Net Toolbox for Matlab, URL: <http://www.ai.mit.edu/~murphyk/Software/BNT/bnt.html>, 2004