

Sensorsystem zur Interaktionskraftbestimmung an einer Fahrzeugtür

Sensor System for the Determination of the Interaction Force at a Vehicle Door

Dipl.-Ing. **Michael Strolz**, TU München

M.Sc. **Gavril Vasilev**, München

Univ.-Prof. Dr.-Ing./Univ. Tokio **Martin Buss**, TU München

Kurzfassung

Aktuierte Fahrzeugtüren mit einer kraftbasierten Regelung stellen eine vielversprechende Möglichkeit zur Steigerung des Ein- und Ausstiegskomforts dar. Sie erfordern die Bestimmung der Interaktionskraft zwischen Bediener und Fahrzeugtür. In dieser Arbeit wird erstmals untersucht, welche Sensorklassen den damit verbundenen Anforderungen gerecht werden. An einem Prüfstand wird die Interaktionskraftbestimmung experimentell an Dehnungsmessstreifen, Foliensensoren und einem Beschleunigungssensor untersucht. Daraus werden Sensorkonzepte abgeleitet, die nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien bewertet werden. Empfohlen wird schließlich die Verwendung eines Beschleunigungssensors in Kombination mit weiteren Sensoren.

Abstract

Actuated car doors with a force-based control are promising to increase the convenience of ingress and egress. They presuppose the determination of the interaction force between user and car door. In this work, for the first time, it is discussed which sensor classes meet the demands arising with this. The measurement of the interaction force is studied by evaluating the performance of strain gages, foil sensors and an acceleration applied to a car door test bed. The results lead to sensor concepts which are reviewed based on technical and financial criteria. Our final recommendation is to use an acceleration sensor combined with a few additional sensors.

1. Motivation

Eine der wichtigsten Prämissen bei der Entwicklung moderner Kraftfahrzeuge ist die Erhöhung der Fahrsicherheit und des Bedienkomforts. Dies führte in den vergangenen Jahren

unter Anderem dazu, dass immer mehr mechanische Systeme aktuiert wurden, um den menschlichen Bediener besser zu schützen (elektrische Gurtstraffer, aktive Kopfstützen, ...) oder bei bestimmten Aufgaben zu unterstützen (Aktivlenkung, aktuierte Heckklappe ...). Auf diese Weise sind auch elektrisch aktuierte Fahrzeugtüren mit einer Steuerungslogik für das Öffnen und Schließen „auf Knopfdruck“ zum Stand der Technik geworden.

Eine naheliegende Erweiterung dieser Systeme ist die Verwendung von zusätzlichen Sensorsignalen, die vom Ein-/Aussteigenden verursacht werden, um eine interaktive Bedienbarkeit der Fahrzeugtür zu erreichen. So könnte beispielsweise die Interaktionskraft zwischen Bediener und Fahrzeugtür bestimmt werden, um über einen kraftbasierten Regelkreis ([1], [2]) eine erleichterte, intuitive und sichere Bedienbarkeit der aktuierten Fahrzeugtür zu erreichen. Die Bestimmung der Interaktionskraft gestaltet sich jedoch schwierig, da der Bediener während der Öffnungs-, der Ein-/Ausstiegs- und der Schließphase an verschiedenen Stellen Kräfte auf die Fahrzeugtür ausübt. Die Art der Krafteinleitung hängt dabei sowohl vom Bediener als auch von der spezifischen Bediensituation ab und weist zudem eine relativ große stochastische Streuung auf.

Ein Sensor allein erscheint aus den genannten Gründen als nicht ausreichend, um eine zuverlässige Messung bzw. Schätzung der Interaktionskraft in allen Bedienphasen zu gewährleisten. Dies muss deshalb über eine geeignete Kombination von Sensoren erreicht werden. Die Sensoren müssen sowohl in technischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht für den Einsatz im Automotive-Bereich geeignet sein und eine Kraftbestimmung gewährleisten, die eine haptisch hochwertige Kraftregelung einer aktuierten Fahrzeugtür ermöglicht.

Bisher ist nach bestem Wissen der Autoren kein Sensorsystem bekannt, das diesen Anforderungen genügt. In dieser Arbeit werden deshalb erstmals Konzepte für die Interaktionskraftbestimmung an einer aktuierten Fahrzeugtür mit einem rotatorischen Freiheitsgrad entwickelt und zu bewertet. Dabei wird davon ausgegangen, dass für den geregelten Betrieb der Tür bereits eine Winkelerfassung vorhanden ist, auf die auch für die Interaktionskraftbestimmung zurückgegriffen werden kann.

Die Arbeit ist wie folgt aufgebaut: Zuerst werden Grundlagen der Interaktionskraftbestimmung vorgestellt und eine Klassifikation relevanter Sensoren entwickelt. Danach erfolgt eine technisch-wirtschaftliche Bewertung dieser Sensoren. Anschließend werden Möglichkeiten für die Bestimmung der Interaktionskraft auf Grundlage der Beschleunigung der Fahrzeugtür und von lokalen Effekten der Krafteinwirkung entwickelt und anhand durchgeführter Experimente diskutiert. Auf dieser Grundlage erfolgt schließlich die Erstellung und Bewertung von Sensorkonzepten. Das Ergebnis ist ein Vorschlag für ein einfaches und effektives Sensorsystem für die Interaktionskraftbestimmung an einer Fahrzeugtür.

2. Grundlagen der Interaktionskraftbestimmung an einer Fahrzeugtür

Wie sich in einer Untersuchung des Benutzerverhaltens beim Ein- und Aussteigen zeigte, gibt es drei wesentliche Interaktionsbereiche zwischen Bediener und Fahrzeugtür, nämlich den Türaußengriff, einen Bereich knapp unterhalb des Türfensters in Richtung der B-Säule sowie den Türinnengriff. Die Punkte der effektiven Krafteinleitung in den jeweiligen Bereichen hängen dabei in hohem Maße vom Bediener (Körpergröße, Gewohnheiten, ...) und der spezifischen Bediensituation (keine Hindernisse, enge Parklücke, ...) ab und weisen zudem sowohl intra- als auch interpersonell eine relativ große stochastische Streuung auf. Die Bestimmung der Interaktionskraft muss damit in drei räumlich getrennten Bereichen großflächig möglich sein, um den Bediener in allen Phasen des Ein-/Ausstiegs durch die aktuierte Fahrzeugtür gezielt unterstützen zu können.

Die Interaktionskräfte zwischen Bediener und Fahrzeugtür bewirken eine spezifische Druckverteilung auf der Fahrzeugtür, die ihrerseits zu Spannungen und Verformungen im Material und zu einer Beschleunigung der Fahrzeugtür führt. Die Phänomene Druck, Verformung und Beschleunigung lassen sich häufig messtechnisch erfassen, so dass eine indirekte Kraftbestimmung möglich ist. Dafür steht eine große Zahl von Verfahren sowie eine äußerst umfangreiche Auswahl an darauf basierenden Sensoren zur Verfügung [3], [4].

Viele Beschleunigungssensoren, wie z.B. die weit verbreiteten Modelle auf Piezobasis, beruhen auf einer indirekten Erfassung der Beschleunigung über Verformungseffekte. Damit ergibt sich die in Bild 1 dargestellte Klassifikation von Sensoren zur Interaktionskraftbestimmung in verformungs- und beschleunigungs-basierte Sensoren (generische Sensorklassifikation: s. [5]). Aufgeführt sind jeweils bedeutende Ausführungsformen, die allerdings nur einen kleinen Ausschnitt der am Markt erhältlichen Sensortypen darstellen.

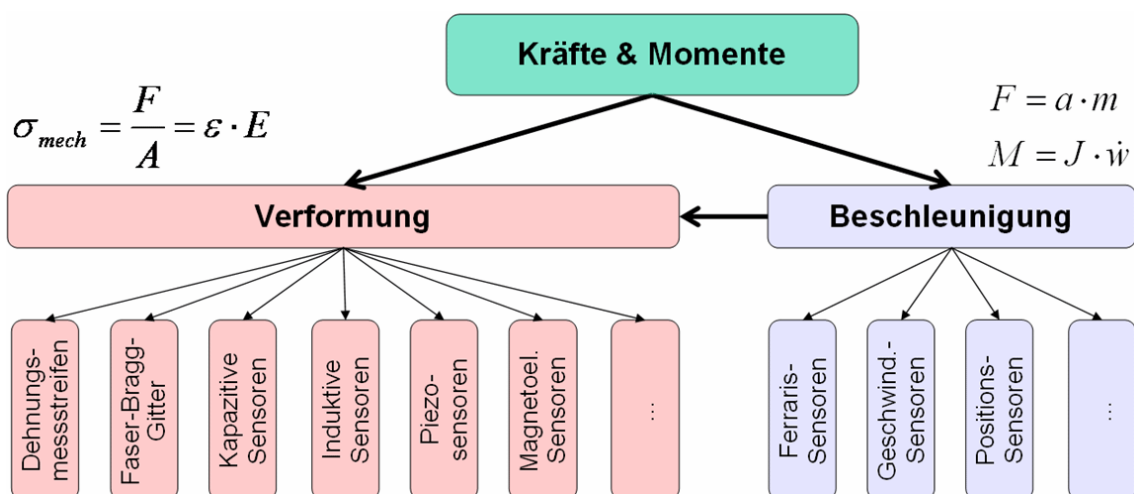


Bild 1: Klassifikation von Sensoren zur Interaktionskraftbestimmung

3. Übersicht geeigneter Sensoren für die Interaktionskraftbestimmung

Es sollten beide in Bild 1 dargestellten Klassen von Kraftbestimmung untersucht werden. Um eine Grundlage für die Wahl geeigneter Sensorklassen zu bekommen, wurde eine Bewertung verbreiteter Sensoren [6] auf Grundlage zentraler Fragestellungen durchgeführt:

- Wie hoch ist die erreichbare Messqualität unter realistischen Einsatzbedingungen? Welcher Beitrag kann in Bezug zum gesamten Sensorsystem geleistet werden?
- Welche mechanische und thermische Robustheit ist gewährleistet? Ist diese für den Einsatz im Automotive-Bereich ausreichend?
- Welchen Aufwand würden die Einführung und dauerhafte Verwendung der Komponenten in die Serienfertigung von Fahrzeugtüren voraussichtlich verursachen?
- Wie hoch sind die zu erwartenden Kosten bei großen Stückzahlen (> 10.000)?

Die Ergebnisse sind qualitativ in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht der Bewertung verschiedener Sensorklassen

(++: sehr positiv, +: positiv, -: negativ, --: sehr negativ, x: keine Information)

	Messqualität	Robustheit	Integration	Kosten
Dehnungsmessstreifen ¹	+	++	-	-
Kapazitiv/Induktiv	+	+	--	+
Magnetoelastisch	x	-	-	x
Piezoelektrisch	+	+	++	-
Beschleunigung (relativ)	++	-	--	--
Beschleunigung (absolut)	+	++	++	-
Winkel, -geschwindigkeit	+	+	+	+

4. Beschleunigungs-basierte Interaktionskraftbestimmung

4.1. Drehmomentbilanzgleichung der Fahrzeugtür

Wird die Winkelbeschleunigung $\ddot{\varphi}$ der Fahrzeugtür erfasst (oder aus $\dot{\varphi}$ oder φ mittels Differentiation bestimmt), so kann die Interaktionskraft \vec{F} über die Drehmomentbilanzgleichung

$$\Sigma M = \vec{F} \times \vec{r} - J \cdot \ddot{\varphi} - M_{\text{Grav}} - M_{\text{Wind}} - M_{\text{Reib}} - M_{\text{Rast}} - M_{\text{Schließ}} = 0$$

bestimmt werden, wenn alle anderen Gleichungsparameter bekannt sind.

¹ Eine Alternative zu DMS könnten Faser-Bragg-Gitter-Sensoren sein, wenn die Autotür aus Faserverbundwerkstoffen gefertigt wird und die Kosten der Auswerteelektronik stark sinken.

Da heutige Fahrzeuge bereits über Neigungssensoren verfügen, wird davon ausgegangen, dass vom Sensorsystem auf diese Daten zurückgegriffen werden kann und so kein separater Sensor für die Bestimmung der Fahrzeugneigungswinkeln γ_p und γ_r benötigt wird, um daraus das durch die Erdanziehung auf die Fahrzeugtür ausgeübte Moment

$$M_{\text{Grav}} = m \cdot l_{\text{SS}} \cdot g \cdot (\sin \varphi \cdot \cos \gamma_p \cdot \sin \gamma_r - \cos \varphi \cdot \sin \gamma_p)$$

zu ermitteln. Für eine genaue Bestimmung des durch Luftströmungen verursachten Moments M_{Wind} gibt es bisher noch keine zufriedenstellenden Lösungen. Diese Komponente wird im Weiteren vernachlässigt und stellt damit eine nicht kompensierte Fehlerquelle dar. Die durch Reibung, Rastmechanik und Türöffnungs-/Türschließeffekte hervorgerufenen Momente M_{Reib} , M_{Rast} und $M_{\text{Schließ}}$ können hingegen modellbasiert kompensiert werden. Da die Winkelbeschleunigung $\ddot{\varphi}$ gemessen werden soll und die Trägheit J der Tür bekannt ist, stellt der Interaktionspunkt \vec{r} der Fahrzeugtür die letzte Unbekannte dar.

4.2. Interaktionspunktbestimmung

Für die Bestimmung der Kraft an der Türaußenseite kann über den Zusammenhang

$$l = l_0 \pm \Delta l \quad \text{mit} \quad l_0 = \frac{l_{\text{max}} + l_{\text{min}}}{2} \quad \text{und} \quad \Delta l \leq \frac{l_{\text{max}} - l_{\text{min}}}{2}$$

der effektive Hebelarm l des Bedieners bzgl. des Türscharniers mit einem maximalen Fehler von $\pm \Delta l / l_0$ bestimmt werden. Unter den Annahmen $l_{\text{min}} = \text{MitteTüraußengriff}$ und $l_{\text{max}} = \text{Türrand}$ ergibt sich damit typischerweise ein Fehler im Bereich von 5-10 %. Dies kann jedoch nicht ohne weiteres auf die Türinnenseite übertragen werden, da Δl dort zu große Werte annimmt. Zumindest auf der Türinnenseite muss daher zusätzlich zur Beschleunigungssensorik eine Erfassung des Interaktionspunkts vorgesehen werden.

Durch den Trend, Kameras zur Überwachung des Fahrzeuginnenraums einzusetzen [7], erscheint eine Interaktionspunktbestimmung über ein solches evtl. ohnehin vorhandenes System als besonders günstig. Dies gilt ebenfalls für die Türaußenseite, deren Interaktionszustand von einem Kamerasystem zur Außenraumüberwachung erfolgen könnte.

Alternativen dazu sind aus technischer Sicht z.B. überwiegend berührungslos (induktiv, kapazitive) oder berührungsbehaftet (taktile, thermoel.) arbeitende Sensoren. Diese müssten jedoch an allen relevanten Stellen der Tür vorgesehen werden. Je nach geforderter Genauigkeit der Interaktionspunktbestimmung führt dies zu hohen Kosten des Gesamtsystems.

Bisher wurde davon ausgegangen, dass nur an einer Stelle der Fahrzeugtür eine Krafterwirkung besteht. Eine interessante Situation ergibt sich, wenn zu einem Zeitpunkt mehr als

eine Interaktionsstelle besteht, die von einem oder mehreren Bedienern herrühren können. Die Diskussion dieser Problemstellung ist jedoch nicht Teil der vorliegenden Arbeit. Im Folgenden wird angenommen, dass über ein Kamerasystem eine Bestimmung der Interaktionsstelle mit einer relativ hohen Genauigkeit erfolgt.

4.3. Beschleunigungsmessung

Es wurde angenommen, dass die aktuierte Tür über einen Winkelsensor verfügt. Aus dem Winkelsignal kann theoretisch über zweimalige Differenzierung die Beschleunigung berechnet werden. In der Praxis wird dies je nach Sensor auf Grund von begrenzter Auflösung bzw. Rauschprozessen nicht ohne Filterung möglich sein, was zu einem für die Regelung inakzeptablen Phasenverzug führen kann.

Abhilfe schafft hier der Einsatz eines absolut messenden Beschleunigungssensors, der laut Tabelle 1 günstige Eigenschaften aufweist. Durch die Kombination mit dem ohnehin vorhandenen Winkelsensor ergibt sich die Möglichkeit, ein Filter zur Kompensation des Offsets des Beschleunigungssignals einzusetzen und über einen Beobachter (z.B. Erweitertes Kalman-Filter) eine sehr präzise Bestimmung von Winkelgeschwindigkeit und Winkel zu erreichen.

Die Beschleunigungsmessung wurde am in Bild 2 schematisch dargestellten Versuchsstand überprüft. Der verwendete Beschleunigungssensor (Typ: BG 2166.10.31) wurde dabei rechts unterhalb des Türaußengriffs platziert. Zudem wurde auf der Scharnierachse ein Encoder befestigt, der eine Validierung des Beschleunigungssignals ermöglichte.

Der Beschleunigungssensor weist eine Bandbreite von 20 Hz auf. In den Versuchen ergab sich für ein mit einem Butterworth-Filter 3. Ordnung mit einer entsprechenden Grenzfrequenz konditioniertes Beschleunigungssignal ein sehr geringes Rauschen.



Bild 2: Versuchsstand zur Validierung der Beschleunigungsmessung

5. Interaktionskraftbestimmung auf Basis lokaler Effekte

In Tabelle 1 sind verschiedene Sensoren aufgeführt, die eine Kraftbestimmung über lokal vorhandene Verformungen oder Drücke ermöglichen. Zwei Sensorklassen wurden als aussichtsreich eingeschätzt: Dehnungsmessstreifen (DMS) und Foliensensoren auf Piezo-Basis.

5.1. Untersuchung von Dehnungsmessstreifen (DMS)

Dehnungsmessstreifen können die lokalen Verformungen ihres Trägers messen. Um zu ermitteln, an welchen Stellen der Fahrzeugtür Verformungen in einer Größenordnung stattfinden, die mit DMS ausgewertet werden können, wurden mittels einer FEM-Analyse zwei typische Lastfälle der Fahrzeugtür untersucht. Lastfall 1 stellt eine Zugbelastung im mittleren Bereich des Außengriffs dar („Griff“), Lastfall 2 eine Druckbelastung im Bereich rechts oberhalb des Außengriffs („Türrand-Bereich“), s. Bild 3 links.

Das Ergebnis war eindeutig: Im Bereich kurz oberhalb des Türschlosses ergibt sich für beide Lastfälle eine deutliche Verformung des Außenblechs der Fahrzeugtür, und damit eine gute Grundlage für einen DMS-Einsatz. An dieser Stelle wurden zwei DMS („DMS3“, „DMS4“) mit unterschiedlicher effektiver Messgitterlänge appliziert ($l_1 = 6 \text{ mm}$, $l_2 = 50 \text{ mm}$). Zusätzlich wurden, wie in Bild 3 recht zu sehen ist, drei weitere DMS an Stellen appliziert, an denen bei Benutzerinteraktion eine signifikante messbare Verformung zu erwarten ist. Ziel war es, in Bezug auf die zwei Lastfälle möglichst günstige Ausgangssignale zu erhalten. Zur DMS-Auswertung wurde ein Trägerfrequenzverfahren mit $f_{CF} = 225 \text{ Hz}$ eingesetzt.

Zur Bewertung der DMS wurde ein Versuch durchgeführt, bei dem auf einer Fläche von etwa 50 mm^2 über eine Federwaage eine definierte Kraft von 40 N an verschiedenen Stellen der Fahrzeugtür aufgebracht wurde. Diese Stellen sind durch die Schnittpunkte der Rasterlinien des Bilds 3 (r.) gegeben.

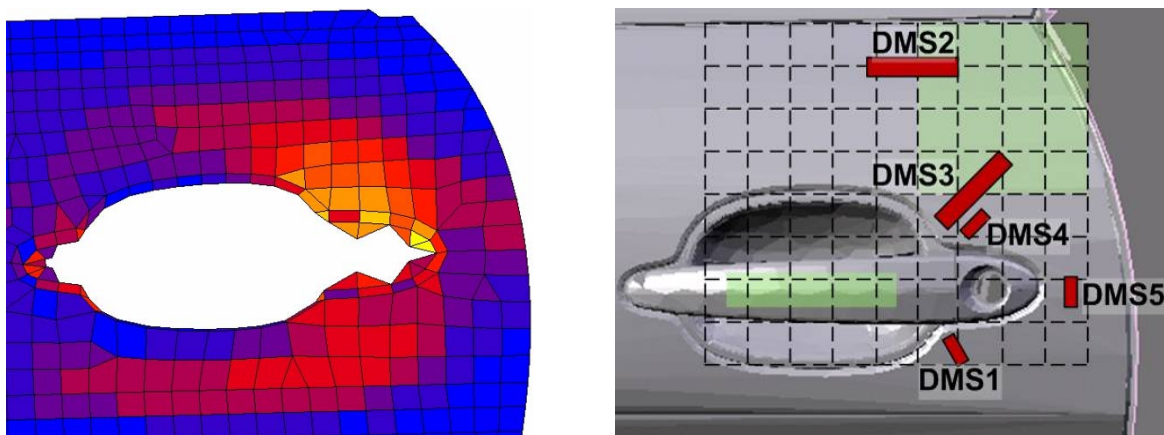


Bild 3: FEM-Simulation der Zugbelastung (l.); Position der DMS sowie Messraster (r.)

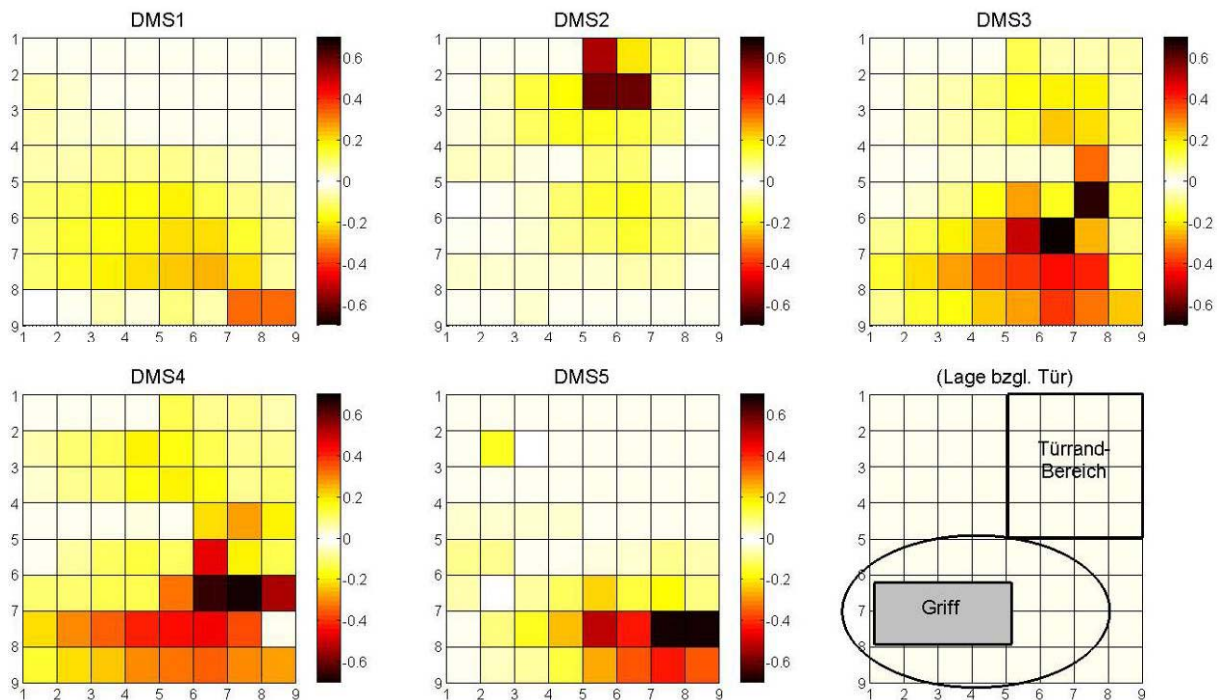


Bild 4: Messergebnis für die einzelnen DMS in Abhängigkeit von der Interaktionsstelle

Die resultierenden Messwerte für die fünf DMS sind in Bild 4 dargestellt (in [V]). Die höchsten Messwerte und damit ein hohes SNR sowohl für den Türrand-Bereich als auch für den Griff ergaben sich, wie erwartet, für DMS3 und DMS4. Da eine stark nichtlineare Abhängigkeit des Messsignals vom Interaktionspunkt gegeben ist, muss dieser für die Kraftbestimmung bekannt sein. Eine Möglichkeit stellt die Verwendung relativ vieler DMS dar, da dann aus den Relationen zwischen den einzelnen DMS-Signalen auf den Interaktionspunkt zurückgeschlossen werden kann. Dies ist jedoch aus Kostengründen uninteressant. Damit liegt die in Kap. 4.2. bereits beschriebene Problemstellung auch hier vor.

In Experimenten konnte die prinzipielle Eignung des DMS4 für die Kraftbestimmung durch den Vergleich mit dem Signal eines Beschleunigungssensors validiert werden. Allerdings stellte sich heraus, dass bedingt durch die bewegliche Mechanik des Türrandgriffs der Verlauf des DMS-Signals beim Öffnen der Tür nicht proportional zur tatsächlichen Beschleunigung und damit zur effektiven Kraft ist. Dieser Effekt muss modellbasiert im DMS-Signal berücksichtigt werden, um eine genaue Bestimmung der Interaktionskraft zu erreichen.

5.2. Untersuchung drucksensitiver Foliensensoren

Auf der Innenseite von Fahrzeugtüren sind die typischen Interaktionsstellen (Türgriff, „Ellbogen-Bereich“) üblicherweise aus Leder, Textil oder Kunststoff gestaltet. Für die Erfassung von Interaktionskräften bieten sich an diesen Stellen deshalb flexible Foliensensoren an.

Es wurde eine experimentelle Studie durchgeführt, bei der 19 Probanden im Sitzen eine Fahrzeugtür am Türinnengriff öffneten und schlossen. Eine Auswertung der 20 am Türinnengriff applizierten druckempfindlichen Foliensensoren ergab, dass bei einer günstigen Platzierung je ein Sensor genügt, um mit relativ hoher Sicherheit ein der positiven bzw. negativen Türbeschleunigung ähnliches Signal zu erfassen. Allerdings waren die erreichbaren Genauigkeiten sehr gering ($\pm 40\%$ Abw.), und es bestehen bisher ungelöste Problemstellungen, z.B. wird ein festes Greifen des Innengriffs als hohe beschleunigende Kraft interpretiert.

6. Entwicklung und Bewertung von Sensorkonzepten zur Interaktionskraftbestimmung

Auf Basis der vorgestellten Überlegungen und experimentellen Ergebnisse wurden Sensorkonzepte für eine aktuierte Fahrzeugtür mit integriertem Winkelsensor entwickelt und bewertet. Eine zentrale Fragestellung dabei war, inwieweit die Erfassung des Interaktionspunkts zwischen Bediener und Fahrzeugtür die Kraftbestimmung durch das jeweilige Konzept verbessert oder sogar erst ermöglicht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Wird nur ein Beschleunigungssensor (oder alternativ ein sehr hoch auflösender Winkelgeber mit Doppeldifferentiator) zur Erfassung der Türbeschleunigung eingesetzt, so wird der Interaktionspunkt im Bereich des Außengriffs der Fahrzeugtür angenommen werden müssen, was zu großen Fehlern bzgl. der Bestimmung einer am Fahrzeuginnengriff wirkenden Kraft führt. Schon durch eine sehr ungenaue Näherungssensorik im typischen inneren und/oder äußeren Interaktionsbereich kann dieser Fehler jedoch stark begrenzt werden. Durch ein System mit Beschleunigungs- und einfacher Interaktionspunktbestimmung ist damit eine gute und insgesamt sehr günstige Lösung gegeben.

Die Verwendung von Sensoren zur Bestimmung der lokalen Effekte der Interaktionskraft ist teuer und komplex. Werden DMS verwendet, so wird zwangsläufig auch eine relativ präzise Interaktionspunktbestimmung benötigt. Weiterhin müssen Lösungen für die angesprochenen Effekte beim Türöffnen (DMS) bzw. beim starken Greifen des Türinnengriffs (Foliensensoren) gefunden werden. Unter diesen Voraussetzungen sollte mit diesem Sensorkonzept eine zufriedenstellende Qualität der Kraftbestimmung möglich sein.

Eine Verbesserung der Qualität kann erreicht werden, wenn zusätzlich ein Beschleunigungssensor verwendet wird, da durch eine Sensordatenfusion der Türzustand wesentlich genauer bestimmt werden kann. Dies sollte selbst dann eine gute Kraftbestimmung ermöglichen, wenn keine weitere Sensorik zur Interaktionspunktbestimmung vorhanden ist.

Es wird davon ausgegangen (s. Kap. 4.2.), dass in zukünftigen Fahrzeugen Sensorsysteme enthalten sein werden, die ohne wesentliche Zusatzkosten für die Bestimmung des Interaktionspunkts eingesetzt werden können. Deshalb wird Konzept 1 als beste Lösung betrachtet.

Tabelle 2: Übersicht über die Sensorkonzepte und ihre Bewertung

(X: Sensor wird verwendet; ++: sehr positiv, +: positiv, -: negativ, --: sehr negativ)

Konzept	Beschl.-sensor	DMS	Folien-sensoren	Gesamt-kosten	Qualität ohne IP	Qualität mit IP
K1	X			+	-	+
K2		X	X	--	--	+
K3	X	X	X	--	+	++

7. Zusammenfassung

Aktuierte Fahrzeugtüren können eine weitere Verbesserung des Bedienkomforts gewährleisten, wenn eine Regelung auf Basis der Interaktionskraft zwischen Bediener und Tür stattfindet. In dieser Arbeit wurden erstmals Sensorkonzepte für die Interaktionskraftbestimmung in allen Bedienphasen entwickelt. Dies erfolgte auf Basis einer Klassifizierung, Bewertung und experimentellen Untersuchung geeigneter Sensoren. Sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Hinsicht wird der Einsatz eines Beschleunigungssensors in Kombination mit einer Interaktionspunktbestimmung als besonders günstig bewertet.

8. Danksagung

Die Arbeit wurde von der BMW Group im Rahmen der Kooperation CAR@TUM unterstützt.

9. Literaturhinweise

- [1] Gorinevsky D.M. et al.: Force Control of Robotics Systems. Boca Raton: CRC Press Inc, 1997
- [2] Ueberle M.: Control of kinesthetic haptic interfaces. In Proc. of IEEE/RSJ Conference IROS2004, Workshop on Touch and Haptics, Sendai, Japan, 2004
- [3] The Institute of Measurement and Control: Guide to the Measurement of Force. London, 1998
- [4] Gevatter H.-J. und Grünhaupt U.: Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion. Berlin: Springer 2006
- [5] White, R.M.: A Sensor Classification Scheme. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 34, Issue 2, S. 124-126, 1987
- [6] Fleming W.J.: Overview of Automotive Sensors. IEEE Sensors J., Vol. 1, No. 4, 2001
- [7] Hagenmayer L. et al: Development and Application of a Universal, Multimodal Hypovigilance-Management-System. Berlin/Heidelberg: Springer, 2007