

# Blickbewegungsdaten in virtuellen Entwicklungsumgebungen

Kai BÜRKLE, Martin SCHMAUDER

*Professur für Arbeitswissenschaft, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden  
Helmholtzstraße 10, D-01069 Dresden*

**Kurzfassung:** Sichtfeldprüfungen an mobilen Baumaschinen werden bisher mit statischen Verfahren und oft in einer späten Phase des Produktentwicklungsprozesses mit realen Prototypen durchgeführt. Untersuchte Einsatzszenarien ergaben jedoch hohe Bewegungsanteile für am Arbeitsprozess beteiligte Menschen und Maschinen. Das Ziel der entwickelten Methode „DYNASICHT“ war daher die ganzheitliche Integration prozessdynamischer Faktoren in einer virtuellen Umgebung. Das dabei erarbeitete Prinzip zur Überführung binokularer Blickdaten in virtuelle 3D-Umgebungen wird näher vorgestellt, da dieses automatisierte Analysen im Zusammenhang mit halbtransparenten Displays wie Head-Up-Displays (HUDs) ermöglicht. Die Anwendung von DYNASICHT wird an einer Baumaschine vorgestellt, ein weiteres Analysebeispiel mit HUD demonstriert.

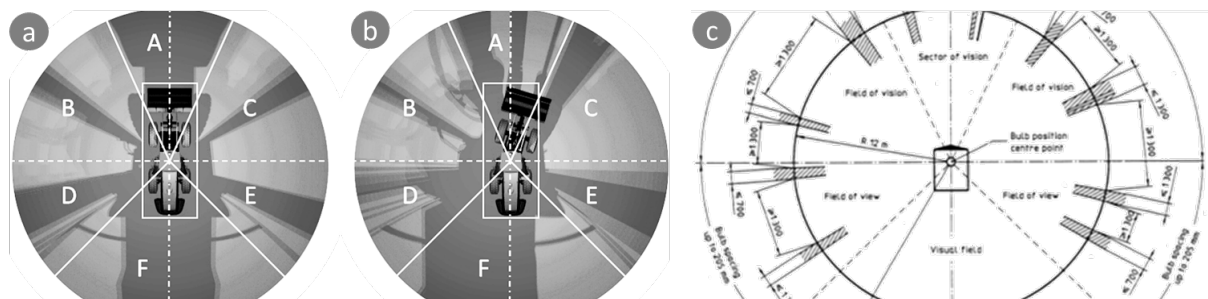
**Schlüsselwörter:** Baumaschinen, virtuelle Prototypen, Sichtfeldanalyse

## 1. Motivation und Zielsetzung

Für die Erfüllung von Fahr- und Arbeitsaufgaben werden rund 80 bis 90 % der relevanten Informationen über den optischen Sinneskanal aufgenommen (Schweigert 2003; Grandjean 1979; Schlick et al. 2010). Daraus lässt sich ableiten, dass Unfälle mit mobilen Baumaschinen häufig auch auf mangelnde Sichtverhältnisse zurückgeführt werden können. Clemens (2014) dokumentiert bereits seit Jahren besonders tragische Fälle, die oft schwerwiegende Verletzungen und sogar tödliche Ausgänge daran Beteiligter nach sich ziehen. Berufsgenossenschaftliche Analysen zu Unfällen im Erdbau untermauern, dass gestalterischer Handlungsbedarf auch heute dringend besteht (Leisering 2013).

Bei der Arbeit mit Baumaschinen stehen die Arbeitsverrichtung und somit oft das Bewegen baugerätespezifischer Maschinenkinematik in einer hochdynamischen Umwelt im Vordergrund. Prozessbedingte Körper- und Blickbewegungen weisen daher gänzlich andere Charakteristika als beispielsweise die eines Autofahrers auf. Dass Sichtverhältnisse in direkter Weise von Körper- und Blickbewegungsstrategien zur Arbeitsverrichtung und von individuellen anthropometrischen Merkmalen abhängen, liegt dabei auf der Hand. Doch gerade die Aspekte der Nutzer- und Prozessorientierung scheinen in der aktuell etablierten Sichtüberprüfungsmethode nach ISO 5006 (TC 127 Sc2 2006), die Hersteller zum Nachweis der Gesetzeskonformität anwenden, nicht in adäquater Weise berücksichtigt. Die Norm basiert auf dem Prinzip des Schattenrissverfahrens. Dabei werden Lampen an den angenommenen Augenpositionen eines Baugeräteführers mit einem normseitig vorgegebenen Ersatzmodell platziert. Sichtverdeckungen durch Maschinenkomponenten werden dann als Schatten sichtbar, deren Anzahl, Lagen und Größen in einer definierten Entfernung um eine Baumaschine herum bestimmt werden können. Diese

Schattenparameter werden anschließend mit in der Norm definierten Anforderungskriterien verglichen. Diesen Kriterien liegen jedoch lediglich gemittelte anthropometrische Maße eines weltweit durchschnittlichen, männlichen Maschinenführers (50. Perzentil) zugrunde. Ihre Gültigkeit für Personen mit abweichenden Körpermaßen ist daher fraglich. Das in der Norm beschriebene Modell berücksichtigt zudem nur eine geringe Kopf- und Oberkörperbewegung, sodass resultierende Augenpositionen ausschließlich auf einer horizontalen Kreisscheibe liegen. Die Dynamik von Maschinen selbst wird schließlich als rein statisches und vereinfachtes geometrisches Problem abstrahiert. Abb. 1 stellt ausgebildete Schatten für normkonforme Anordnungen (a) den Schattenausprägungen durch beispielhaft von der Norm abweichende Lampenposition und Maschinenstellung (b) gegenüber. Der Vergleich resultiert in deutlichen Unterschieden von Schattengrößen und -positionen. Zudem verdeutlicht das im Prüfergebnis angefertigte Dokument (c) mit Markierungen auf dem Sichtkreisradius, dass eine Rückführung auf konkrete, Sichtverdeckung erzeugende Elemente einer überprüften Maschine im Nachhinein kaum möglich ist. Diese Art der Dokumentation stellt somit eine Erschwernis für Entwickler dar.



**Abbildung 1:** Schattenriss am Radlader mit Anordnung nach ISO 5006:2006 (a), Schattenriss mit von der Norm abweichenden Maschinenstellung und Prüflampen (b), beispielhafter Ausschnitt zur Dokumentation eines Prüfergebnisses nach Norm (c) (Bürkle o.J.).

Die Anforderungen an die von der DFG geförderten Methodenentwicklung „DYNASICHT“ bestanden darin, dynamische Einflüsse virtuell und umfassend zu berücksichtigen, die sich zur Erfüllung des Arbeitsprozesses aus dem Zusammenspiel von Mensch, Maschine und Umwelt ergeben. Das bedeutet, dass es zunächst geeignete Ansätze zu entwickeln galt, um Aspekte der Nutzer- und Prozessorientierung analysieren und definieren zu können. Besonderes Augenmerk wurde auf die Variabilität von Körper- und Blickbewegungen anthropometrisch differenzierter Nutzer, die Maschinendynamik, die Einsatzcharakteristik und vor allem auf die Verknüpfung dieser Merkmalsgruppen gelegt. Es zeichnete sich ab, dass manuelle Auswertungsverfahren nicht anwendbar waren. Daraus ergaben sich besondere Anforderungen in Form einer für die digitale Ergonomie geeigneten Datenverarbeitung sowie einer rechnergestützten Beurteilung mit Hilfe automatisierter Verfahren.

## 2. Methode

Der Ansatz bei der Methodenentwicklung basierte grob auf einer dreistufigen, sequentiellen Herangehensweise:

Zweck der ersten Phase war die Datenakquise bei Untersuchungen mit realen und virtuellen Maschineneinsätzen. Um virtuelle Arbeitseinsätze abzuleiten, wurden zunächst Feldversuche durchgeführt. Die im Anschluss daran mit dem interaktiven

Baumaschinensimulator durchlaufenen Arbeitsszenarien lieferten neben den anthropometrischen Daten der jeweiligen Versuchsteilnehmer weitere Messdaten zur prozessbezogenen Maschinendynamik eines virtuellen Radladers sowie zugehörige Körper- und Blickbewegungen. Körperbewegungen wurden mit der Unterstützung des Instituts für Arbeitsschutz (IFA) mit dem CUELA - Messsystem erhoben. Zur Blickerfassung wurde das System „Eyelink II“ verwendet.

In der zweiten Phase wurden akquirierte Datensätze im Entwurfswerkzeug 3ds max vereint. Die sich daraus ergebende Kombination aus messdatengesteuerter Körper- und Blickbewegung des digitalen Menschmodells CharAT Ergonomics und logdatenbasierter Maschinenanimation, welche die Professur für Baumaschinen und Fördertechnik der TU Dresden bereitstellten, bildete die Arbeitseinsätze virtuell ab.

Diese, als „Sichtdynamik“ bezeichnete, ganzheitliche Kopie der interaktiven Versuche diente in der dritten Phase als Voraussetzung zur Entwicklung einer automatisiert ablaufenden und quantifizierenden Sichtbeurteilungsmethode.

Im Folgenden wird die Überführung von Blickbewegungsdaten in die virtuelle Umgebung näher beschrieben, da die Verfügbarkeit dynamischer Sehstrahlen auf Basis solcher Daten nicht nur eine Neuerung im Rahmen von Sichtuntersuchungen anhand virtueller Prototypen darstellt, sondern auch ermöglicht, neuartige Informationsschnittstellen wie z. B. Head-Up-Displays (HUDs) in Sichtanalysen miteinzubeziehen.

## 2.1 Prinzip zur Übertragung zweidimensionaler Blickkoordinaten in 3D-Umgebungen

Abb. 2 zeigt Darstellungsmethoden, die häufig zur Analyse von Blickdaten verwendet werden. Dabei werden Fixationen markiert und mit Videosequenzen einer Szenekamera aus Perspektive des Betrachters in sog. „Overlay-Videos“ überlagert.



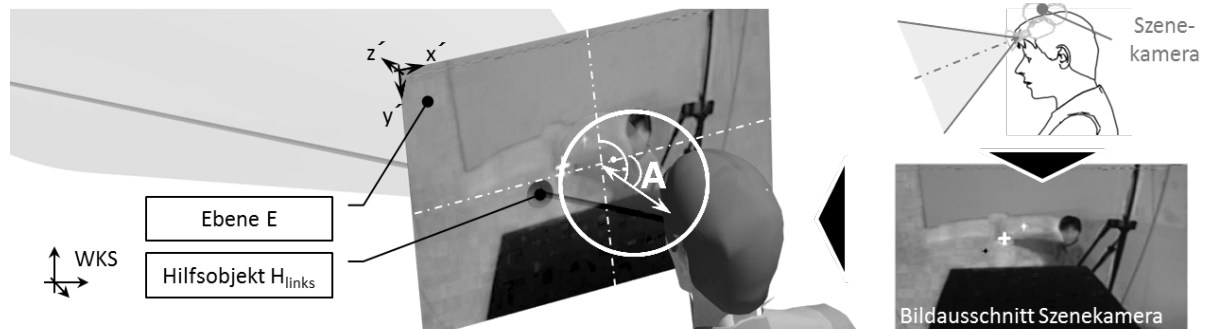
**Abbildung 2:** Beispiele für konventionelle Darstellungsmethoden von Blickdaten. Links: Heat-Map-Darstellung (Breeze 2009), Rechts: Gaze-Trail-Darstellung (tobii.com 2009).

Macht man sich die technischen Daten eingesetzter Hardwarekomponenten (Spezifikationen zur Optik der eingesetzten Szenekamera und Parameter zur Auflösung der Videosequenzen) zunutze, können Eyetracking-Daten auch in 3D-Umgebungen überführt werden. Im Fall des Eyelink II – Systems beträgt der horizontale Blickwinkel der eingesetzten Szenekamera  $\alpha = 95^\circ$ , die Auflösung der Videosequenz  $B \times H = 720 \times 480$  Pixel. Damit steht der in Abb. 3 markierte Abstand A einer theoretischen, parallel zur Frontalebene des Gesichtes ausgerichteten Projektionsebene E für den Bildausschnitt der Szenekamera (Abbildung 3 rechts) mit folgender Formel (1) in trigonometrischem Zusammenhang:

$$A = \left[ \tan\left(\frac{180 - \alpha}{2}\right) \right] \cdot \frac{B}{2} \quad (1)$$

Mit programminternen Funktionen lassen sich nun hierarchische Zusammenhänge konfigurieren, sodass in Eyetracking-Datensätzen enthaltene x- und y-Koordinaten

auf virtuelle Hilfsobjekte (z. B.  $H_{links}$  in Abb. 3) übertragbar werden. Dabei ist Ebene E an die Position und Ausrichtung des Kopfes gebunden. Das Hilfsobjekt selbst erbt die Transformationen der Ebene E, sodass sich importierte Blickkoordinaten auf das lokale Koordinatensystem von E mit dem Ursprung in der linken oberen Ecke beziehen. Ein Sehstrahl lässt sich dann mit einem weiteren Objekt darstellen, dessen Startpunkt in Augenposition liegt und mit der Längsachse auf das entsprechende Hilfsobjekt ausgerichtet wird.



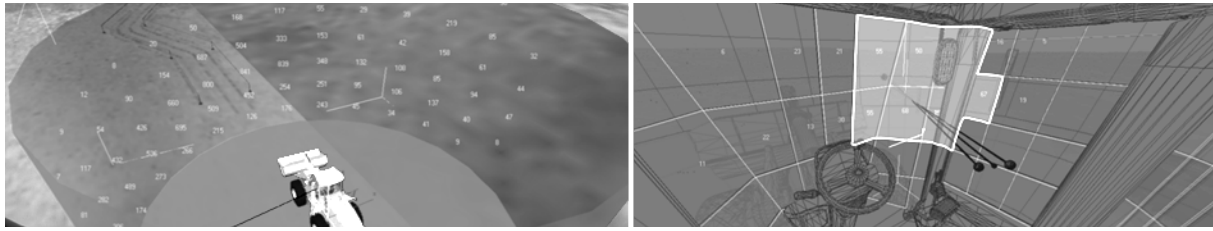
**Abbildung 3:** Geometrischer Zusammenhang von Blickkoordinaten mit virtuellem Konstrukt für den Import von Blickdaten am Beispiel des Sehstrahls für das linke Auge (Bürkle (o.J.)).

## 2.2 Virtuelle Bestimmung einer Distanz zwischen Betrachter und Fixationsziel

Wenn Blickdaten für beide Augenbewegungen vorliegen, ist es möglich, über Vergenzwinkel Abstände zwischen Betrachter und fixierten Sehzielen näherungsweise zu bestimmen. Die Näherung ist dadurch bedingt, dass sich Sehstrahlen nur theoretisch in einem Punkt schneiden. Praktisch liegen die mittels Blickbewegungsdaten gesteuerten Strahlen jedoch fast immer windschief zueinander. Daher dient der Mittelpunkt der kürzesten Verbindung zwischen den beiden Geraden als Schnittpunktersatz. Dessen räumliche Lage kann mathematisch über das Lösen eines linearen Gleichungssystems bestimmt werden. Für eine dynamische Umsetzung in 3ds max waren dafür parametrische Lösungen notwendig. Diese wurden rechnergestützt mit wolfram alpha (2014) ermittelt.

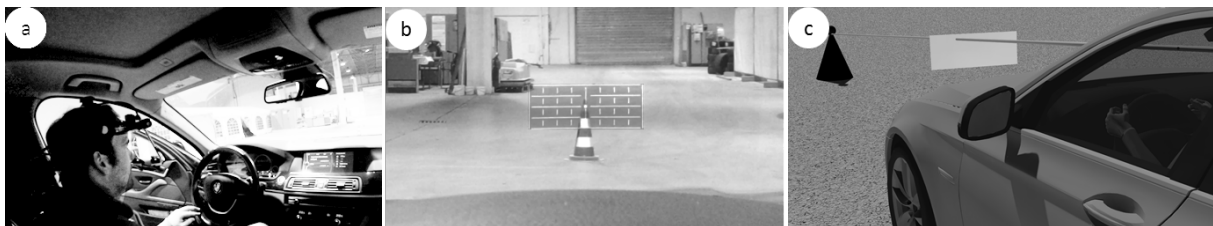
## 3. Ergebnisse

Nach Generierung der Sichtdynamik werden Durchdringungen von Sehstrahlen mit weiteren, beliebig definierbaren, virtuellen Objekten über ein Skriptprogramm framebasiert markiert. Dieses ordnet generierten Markern Merkmale zu, die vom jeweiligen Strahlenverlauf (keine Sichtbehinderung, Durchdringen transparenter Objekte, indirekte Sicht über Spiegel, Kollision mit sichtverdeckenden Elementen) abhängen. Zur Referenzierung des Sehraums wurde beispielhaft ein Zylinder um die Maschine eingeführt, der translatorisch und rotatorisch mit dem Kabinenmodell verknüpft ist und als Analyseelement zur Feststellung von Fixationsverteilungen dient (Abb. 4 links). Für die Einteilung von Sehraumabschnitten wird dieser mit einem frei wählbaren Raster strukturiert. Durchdringungen der einzelnen Rasterabschnitte werden dann merkmalsbezogen ausgezählt. Abb. 4 rechts zeigt die Anwendbarkeit desselben Prinzips auch für andere Elemente wie z. B. der Windschutzscheibe. Die Markierung im dargestellten Beispiel hebt die am häufigsten durchdrungenen Segmente der Scheiben beim Fahrmanöver „Rechtskurven“ hervor.



**Abbildung 4:** Verlaufsabhängige Auszählung der Sichtdynamik. Links: Referenzierung mit Zylinder. Rechts: Segmentierte Windschutzscheibe mit Fixationsverteilung (Bürkle (o.J.)).

Die Bestimmung von Distanzen aus Blickdaten wurde mit einem HUD in einem unbewegten Pkw getestet (Abb. 5). Damit konnte gezeigt werden, dass das Verfahren geeignet ist, zwischen fixierten Zielen zu unterscheiden, wenn virtuelle Sehstrahlen hintereinander liegende Stimuli gleichzeitig durchdringen (HUD und Kegel Abb. 5 b).



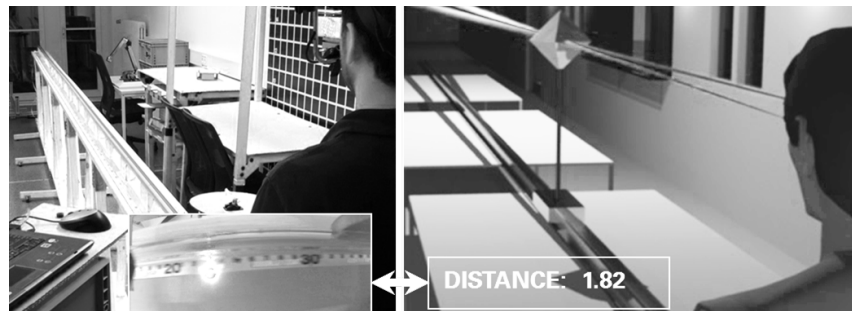
**Abbildung 5:** Unterscheidung zwischen vom Betrachter (a) fixierten Fixationszielen, wenn diese hintereinander angeordnet sind (b) in einem virtuellen Entwurfswerkzeug (c)

Die objektive Wichtung von Sehraumabschnitten gibt Hinweise für einen einsatzorientierten Konstruktionsentwurf einer Baumaschine. In Kombination mit dem Verfahren zur virtuellen Distanzermittlung können auch künftige visuelle Schnittstellen mit HUD - Technologie in Sichtfeldanalysen miteinbezogen werden.

#### 4. Diskussion und Ausblick

Mittels einer synchronisierten Gegenüberstellung datengesteuerter, virtueller Fahrerperspektiven mit Overlay - Videos des Eyelink II - Systems wurden Abweichungen zwischen virtuellen und realen Blickverläufen festgestellt. Diese sind primär von der Qualität der jeweiligen Datensätze abhängig, jedoch auch das Ergebnis einer komplexen Verkettung mehrerer Fehlerquellen. Neben dem Einfluss der Darstellung der virtuellen Simulationsumgebung wurden Auswirkungen durch Fehler bei der Anpassung des Menschmodells an individuelle Körpermaße, bei Mess- und Übertragungsvorgängen der Körperbewegung sowie durch Hardwareeigenschaften und des Kalibriervorgangs des Eyelink II als mögliche Ursachen identifiziert. Daher ist bei einer beabsichtigten Sehzielidentifikation immer eine Überprüfung mit Overlay-Videomaterial notwendig. Für eine Betrachtung dynamischer Tendenzen ist die Anwendung von DYNASICHT dennoch möglich, da Ungenauigkeiten keinen Einfluss auf Bewertungsverfahren haben, die auf einer Häufigkeitsverteilung von Sehstrahlen in gerasterten Bereichen basieren. Für eine Bestimmung von Distanzen auf Basis von Vergenzbewegungen ist bekannt, dass mit zunehmender Entfernung fixierter Sehziele eine Parallelstellung der Sehachsen erfolgt. Recherchen nach maximalen Entfernungen, ab denen die Distanzbestimmung für Objekte, die sich dynamisch weg- oder zubewegen, nicht mehr möglich sind, blieben bislang jedoch ohne Erfolg. Daher wurde ein Versuchsstand konzipiert (Abb. 6). Damit scheint es möglich, neben

der Ermittlung von Entfernungsgrenzen auch weitere Aspekte wie z. B. Auswirkungen einer ausgeprägten Augendominanz empirisch zu untersuchen.



**Abbildung 6:** Versuchsstand zur Bestimmung einer kritischen Entfernung für eine mit Blickbewegungsdaten ermittelte Distanz von in Blickrichtung dynamisch bewegten Objekten

Die diesjährigen Änderungen im Prämiensystem der BG RCI (2014) (nur noch nachgerüstete Rückfahrkameras an Altmaschinen prämierfähig, für Neumaschinen hingegen als selbstverständlich vorausgesetzt) oder die Notwendigkeit der Unterbringung zusätzlicher, sichtverdeckender Module zur Abgasnachbehandlung aufgrund von Verschärfungen durch Emissionsrichtlinien (97/68/EG idF 2009) sind Indikatoren, die auf einen künftig wachsenden Bedarf an neuen Mensch-Maschine-Schnittstellen für Assistenzsysteme in mobilen Arbeitsmaschinen deuten. Somit ist eine steigende Relevanz der Verfügbarkeit von Blickdaten in virtuellen Umgebungen zur prozessorientierten Konzeptentwicklung zu erwarten.

## 5. Literatur

- Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (2014): Das Prämiensystem der Branche Baustoffe Steine Erden 2014. Abgerufen am 11.11.14. [http://www.bgrci.de/fileadmin/BGRCI/Downloads/DL\\_Praevention/Praemiensystem/RZ\\_Finale\\_Praemiensystem\\_Broschuere\\_2014\\_low.pdf](http://www.bgrci.de/fileadmin/BGRCI/Downloads/DL_Praevention/Praemiensystem/RZ_Finale_Praemiensystem_Broschuere_2014_low.pdf).
- Breeze J (2009) You look where they look – People look at other people's faces. Blogbeitrag. Abgerufen am 03.06.14. <http://usableworld.com.au/2009/03/16/you-look-where-they-look/>.
- Bürkle K (o.J.) TU Dresden: Methode zur nutzergruppenabhängigen, dynamischen Sichtuntersuchung bei mobilen Arbeitsmaschinen anhand virtueller Prototypen. Entwurf zur Dissertation.
- Bürkle K, Hoske P (2013) Method to determine the operator's view with virtual prototypes regarding dynamic process- and user-characteristics. Fachbeitrag und Tagungsunterlagen zur Automotive Seating Reloaded 2013, Berlin: we.CONECT Global Leaders GmbH (Veranstalter).
- Clemens R (2014) Arbeitsgemeinschaft Netzwerk Gesundheit und Qualifikation: Unfälle mit Baumaschinen. Abgerufen am 15.09.14. <http://www.ral-bau.eu/unfaelle-mit-bm-2014/>.
- Grandjean E (1979) Physiologische Arbeitsgestaltung. Thun: Ott Verlag.
- ISO/TC 127 Sc 2, ISO Technical Committee Safety, ergonomics and general requirements (2006) Erdbaumaschinen - Sichtfeld - Testverfahren und Anforderungskriterien. ISO 5006:2006.
- Leisering H (2013) Aktuelle Entwicklungen im Straßen- und Tiefbau. Braunschweig: Verein Deutscher Revisions-Ingenieure e.V. (VDRI) B. d. Bauwirtschaft (Hrsg.) 33-36.
- Schlick CM, Bruder R, Luczak H (2010) Arbeitswissenschaft. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Schweigert M (2003) TU München: Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben. Dissertation. Abgerufen am 05.01.14. <http://mediatum.ub.tum.de/doc/601886/601886.pdf>.
- Tobii Technology GmbH (2011) Eye Tracking brings clarity to 'driving without awareness'. Abgerufen 01.08.14. <http://www.tobii.com/eye-tracking-research/global/library/customer-cases/cognitive-psychology/attitudes/>.
- Wolfram Alpha LLC - A Wolfram Research Company (2014) WolframAlpha computational knowledge engine. Abgerufen am 07.02.2014. <http://www.wolframalpha.com/>.
- 97/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte.