

12. IFF-Wissenschaftstage

16.-18. Juni 2009



Werkzeuge und Technologien

Optimierung der See-Through-Kalibrierung für mobile Augmented-Reality-Assistenzsysteme

Bacc. Jens Grubert

Dipl.-Ing.-Inf. Johannes Tümler

Dr.-Ing. Rüdiger Mecke

Lebenslauf



Bacc. Jens Grubert

Hilfswissenschaftlicher Mitarbeiter

Fraunhofer-Institut für
Fabrikbetrieb und -automatisierung
Sandtorstraße 22
39106 Magdeburg

Telefon: 0391 40 90 715

E-Mail: jens.grubert@iff.fraunhofer.de

2000-2002

Comlab MD Magdeburg
Mitbegründer und Programmierer

Seit 2003

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Diplomstudiengang Computervisualistik

2004-2007

Hoffmann Werbeagentur Magdeburg
Programmierer

2007

University of Calgary, Kanada
Berufspraktikum Large Display Interaction

Seit 2008

Fraunhofer IFF Magdeburg
Hilfswissenschaftlicher Mitarbeiter im Kompetenzfeld
Virtual Prototyping

Optimierung der See-Through-Kalibrierung für mobile Augmented-Reality-Assistenzsysteme

Bacc. Jens Grubert, Dipl.-Ing.-Inf. Johannes Tümler, Dr.-Ing. Rüdiger Mecke

1. Einleitung

Augmented Reality (AR) Systeme blenden virtuelle Objekte situationsgerecht in reale Umgebungen ein. Mobile AR-Systeme nutzen zur Anzeige oftmals Optical-See-Through Head Mounted Displays (OST-HMDs), welche die Bereitstellung solcher Informationen bei gleichzeitig gut wahrnehmbarer Umgebung ermöglichen. Zur lagerichtigen Einblendung in OST-HMDs ist es notwendig, die Position und Blickrichtung des Anwenders in Bezug zu seiner Umgebung zu erfassen. Insbesondere bei OST-HMDs sind die Orientierung und Lage der Erfassungssensorik (z.B. Kamera) relativ zum Auge sowie die Eigenschaften des Auge-Display Verbundes mathematisch zu berücksichtigen. Dieses als See-Through-Kalibrierung (STK) bezeichnete Verfahren ist notwendig, um reale Objekte aus Sicht der Anwender lagerichtig mit virtuellen Objekten überblenden zu können.

Zu bestehenden See-Through-Kalibrierverfahren liegen bisher kaum Aussagen über erreichbare Überlagerungsgenauigkeiten vor. Die Auswahl eines STK Verfahrens für einen konkreten Anwendungsfall hängt jedoch maßgeblich von den vorliegenden Genauigkeitsanforderungen ab.

Dieser Beitrag beschreibt eine Nutzerstudie zum Vergleich zweier Durchführungsmethoden der STK hinsichtlich Überlagerungsgenauigkeit und Durchlaufdauer. Dabei werden im Gegensatz zu bisherigen Untersuchungen auch nutzerbezogene Aspekte während der Kalibrierung berücksichtigt.

2. Verwandte Arbeiten

Während die Durchlaufdauer von STK Verfahren automatisch protokolliert werden kann, ist die Beurteilung der Überlagerungsgenauigkeit von OST-HMD basierten AR Systemen komplexer. In bisherigen Arbeiten wurden dazu vorrangig zwei Herangehensweisen verfolgt. Bei einigen Forschungsprojekten wurden Nutzer von AR Systemen befragt, wie sie die Überlagerungsgenauigkeit zwischen virtuellen und zugehörigen realen Objekten einschätzen [FMS93]. Diese qualitative Angabe der Genauigkeit (z.B. "akzeptabel" bis "nicht akzeptabel") ist u.a. von subjektiven Einschätzungen der Nutzer sowie von den Genauigkeitsanforderungen der zu erledigenden Aufgaben abhängig. In anderen Arbeiten wurde das menschliche Auge durch eine Kamera simuliert und der Überlagerungsfehler zwischen realen und rechnergenerierten Objekten wurde durch bildbasierte Messungen bestimmt (so z.B. in [OZT+04]). Durch diese im Vergleich zur qualitativen Beurteilung aufwändigere Herangehensweise erhält man quantitative Aussagen über die Überlagerungsgenauigkeit. Ein Nachteil dabei ist das Vernachlässigen von nutzerbezogenen Aspekten. So werden das Verrutschen des OST-HMDs während der Kalibrierung oder eine durch Nutzer ungenau vorgenommene Überlagerung als Fehlerquellen vernachlässigt. In [MGT+01] wurde ein Ansatz zur quantitativen Erfassung der Überlagerungsgenauigkeit unter Berücksichtigung nutzerbezogener Fehlerquellen vorgestellt. Die Autoren umgehen die Schwierigkeit, keinen Zugriff auf die auf der Netzhaut projizierten Informationen zu haben, in dem sie die Nutzer die Projektion eines rechnergenerierten Objektes auf ein Messfeld (in diesem Fall ein Grafiktablett) ortsbezogen angeben lassen. Mit diesem Messfeld kann die Überlagerungsgenauigkeit jedoch nur in Armreichweite der Nutzer überprüft werden. Für größere Arbeitsbereiche ist diese Methode nicht geeignet.

3. Nutzerstudie

In diesem Beitrag wird eine Nutzerstudie vorgestellt, in der die Überlagerungsgenauigkeit und die Durchführungsdauer zweier Durchführungsmethoden der STK unter Berücksichtigung nutzerbezogener Faktoren quantitativ verglichen wird. Im Gegensatz zu vorherigen Arbeiten kann die Überlagerungsgenauigkeit für verschiedene Arbeitsentfernungen bestimmt werden. Zusätzlich wurden subjektive Einschätzungen hinsichtlich der Nutzerakzeptanz erfasst.

3.1. Teilnehmer

An der Nutzerstudie nahmen 22 Probanden (2 weiblich, 19 männlich) teil. Sie waren im Durchschnitt 25,1 Jahre alt (σ 2,32). Bei den Probanden handelte es sich hauptsächlich um Studenten der Informatik. Acht Probanden trugen eine Sehhilfe (Kontaktlinsen oder Brille). Alle Probanden hatten Computererfahrung. Neun von Ihnen hatten noch keine Erfahrung auf dem Gebiet der AR. Elf Probanden hatten noch nie Umgang mit einem HMD, zwei Probanden nutzten HMDs bereits mehr als zweimal.

3.2. Versuchsaufbau

In der Nutzerstudie wurde die in [TMX07] entwickelte und in [GTM08] weiterentwickelte Ein-Schritt-Kalibrierung (ESK) mit dem in [TZO03] vorgestellten „Tiefen-SPAAM“ und im Rahmen dieser Arbeit erweiterten Verfahren der Mehr-Schritt-Kalibrierung (MSK) hinsichtlich Überlagerungsgenauigkeit und Durchführungsdauer verglichen. Als Trackingsystem wurde ein optisches Inside-Out Tracking mit Papiermarkern verwendet. Als OST-HMD wurde ein Microvision Nomad-ND2100 eingesetzt.

Beim Verfahren des „Tiefen-SPAAM“ nehmen Anwender eine sequenzielle Zuordnung mehrerer 2-D Einblendungen zu einem 3-D Passpunkt vor (siehe Abbildung 1 Mitte). Laut [TZO03] führt die MSK Methode "Tiefen-SPAAM" zu genauen Ergebnissen, wenn die Entfernung der Anwender zum verwendeten Passpunkt mehrmals verändert wird. Die hier verwendete MSK unterscheidet sich vom Verfahren des „Tiefen-SPAAM“ dadurch, dass die virtuellen 2-D Einblendungen vorgegeben, aus welcher Position und Orientierung 3D-Passpunkte überlagert werden sollen, sodass eine inhomogene räumliche Verteilung der Passpunkte forciert wird. Ein potentieller Nachteil des Verfahrens ist der hohe zeitliche Aufwand bei der Durchführung, der durch die mehrmalige Neupositionierung der Anwender entsteht.

Die am Fraunhofer IFF entwickelte ESK ist die konsequente Fortsetzung des MSK-Verfahrens indem es eine Anordnung mehrerer 3-D Passpunkte auf einem Kalibrierkörper (siehe Abbildung 1, links). Durch die Anordnung der Passpunkte wird ein Tiefenbereich von ca. 70 cm abgedeckt. Der tatsächliche Kalibrierbereich hängt vom Sichtfeld des verwendeten OST-HMDs sowie von nutzerbezogenen Faktoren (z.B., Positionierung der Nutzer, Sitz des OST-HMDs auf dem Kopf der Nutzer) ab. Mit dem in dieser Nutzerstudie verwendeten Microvision Nomad ND2100 betrug die kalibrierte Tiefe aus Sicht der Nutzer ca. 100 cm – 170 cm.

Um quantitative Aussagen zur Überlagerungsgenauigkeit unter Berücksichtigung nutzerbezogener Fehler treffen zu können, wurde eine Messanordnung erstellt, bei welcher der Abstand zwischen realen und virtuellen Objekten mit Hilfe eines Laserpointers angegeben werden kann (siehe Abbildung 1, rechts). Es wurde dazu eine Testtafel mit papierbasierten Markern eingesetzt. Diese wurde innerhalb des Kalibrierbereichs (ca. 120 cm Abstand zum Probanden) aufgestellt. Auf der Testta-

fel befinden sich fünf Marker. Diese sind so angeordnet, dass sie in den Ecken und in der Mitte des OST-HMDs zu sehen sind. Für jeden der fünf Marker auf der Testtafel kann für eine geladene Kalibrierung ein virtueller Marker überlagert werden. Über einen Laserpointer können die Eckpunkte der virtuellen Marker auf der Testtafel durch die Testperson markiert werden. Durch Abstandsbestimmung zwischen Laserpointermarkierung und realer Markerposition kann die Überlagerungsgenauigkeit in der Arbeitsentfernung ermittelt werden. Um die Eingabegenauigkeit mittels Laserpointer zu erhöhen, kann der Kopf während der Eingabe auf einer Kinnstütze abgelegt werden.



Abbildung 1: Probanden bei der Durchführung der ESK (links), der MSK (Mitte) sowie bei der Angabe des Überlagerungsfehlers (rechts).

3.3. Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde auf einen Zeitraum von 60 Minuten ausgelegt und wurde in zwei Phasen durchgeführt. Alle Probanden führten sowohl die ESK als auch die MSK Methode durch, wobei die Hälfte der Probanden die ESK zuerst durchführte und die andere Hälfte die MSK.

In der ersten Phase wurde zunächst je ein Probedurchgang der ESK bzw. MSK durchgeführt. Beide Kalibriermethoden wurden im Sitzen durchgeführt. Nach den Probedurchgängen wurden die Probanden gebeten, das OST-HMD auf ihrem Kopf nicht mehr zu verschieben. Die Probanden führten nun nochmals beide Methoden durch, wobei die Durchführungsdauer automatisch protokolliert wurde. Als Ergebnis liegen pro Methode jeweils ein Satz von Kalibrierparametern (Kalibrierdatei) vor.

Die zweite Phase umfasste die Ermittlung des Überlagerungsfehlers für beide Methoden am oben beschriebenen Messstand. Es wurden Messungen an der Testtafel in 120 cm Abstand vorgenommen. Um die Beeinflussung durch subjektive Präferenzen für eine der beiden Kalibriermethoden auszuschließen, war für die Probanden nicht ersichtlich, welche der beiden Kalibrierdateien jeweils für die Überlagerung verwendet wurde. Die Probanden gaben mittels Laserpointer die Position der Eckpunkte der virtuellen Rechtecke auf der Testtafel an. Der angezeigte Punkt wurde durch einen Versuchsleiter markiert und später der Versatz zum zugehörigen Eckpunkt des realen Markers ausgemessen. Zusätzlich zur Erfassung der Überlagerungsgenauigkeit im kalibrierten Volumen wurde die Überlagerungsgenauigkeit außerhalb dieses Bereiches untersucht. Dazu wurde neben der Testtafel in 120 cm Entfernung eine zweite Testtafel in ca. 70 cm Entfernung verwendet.

3.4. Hypothesen

Es wurde erwartet, dass die ESK Methode schneller durchzuführen ist als die MSK Methode. Weiterhin wurde erwartet, dass die Überlagerungsgenauigkeit beider Verfahren innerhalb des kalibrierten Bereiches ähnlich ist. Daher lauten die Hypothesen:

H1: Die ESK ist schneller durchführbar als die MSK.

H2: Die Überlagerungsgenauigkeit beider Verfahren ist innerhalb des kalibrierten Bereiches nicht signifikant unterschiedlich.

3.5. Ergebnisse

Von den 22 am Versuch teilnehmenden Probanden konnten nur Datensätze von 20 Probanden ausgewertet werden.

Die Durchführungsdauer betrug für die ESK Methode im Mittel 92 Sekunden (σ 50,8) und für die MSK Methode im Mittel 155 Sekunden (σ 35,1).

Die Ergebnisse zur Überlagerungsgenauigkeit in 120 cm Entfernung sind in Abbildung 2 dargestellt. Der Unterschied in der Überlagerungsgenauigkeit in einem Testabstand von 120 cm beträgt im Durchschnitt ca. 0,2 cm zugunsten der MSK, ist aber statistisch nicht signifikant ($p > 0,05$, t-test).

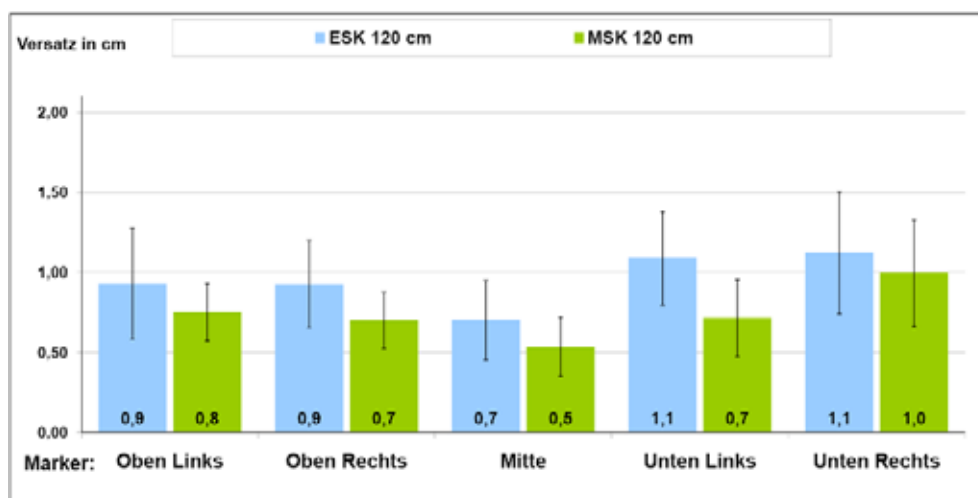


Abbildung 2: Mittlere Überlagerungsfehler sowie Standardabweichungen zwischen realen und virtuellen Markern in einem Testabstand von 120 cm. Die Markerpositionen entsprechen der Markeranordnung aus Abbildung 1, rechts.

Für die Testtafel außerhalb des kalibrierten Bereiches (ca. 70 cm) traten signifikante Unterschiede in der Überlagerungsgenauigkeit ($p < 0,05$, t-test) auf (siehe Abbildung 3). Der Kalibrierfehler der ESK war im Durchschnitt 0,72 cm größer als der Kalibrierfehler der MSK. Obwohl beide Versuchsdurchläufe darauf ausgelegt waren den gleichen Kalibrierbereich (ca. 100 - 170cm) abzudecken, zeigte eine Analyse der Trackingdaten aller Probanden, dass dies nicht der Fall war. So begann der kalibrierte Bereich der ESK Methode bei durchschnittlich 106 cm (σ 2,7), bei der MSK Methode bei durchschnittlich 87 cm (σ 6,6). Der Bereich endete bei der ESK Methode durchschnittlich bei 166 cm (σ 2,8), bei der MSK im Mittel bei 188 cm (σ 20,6).

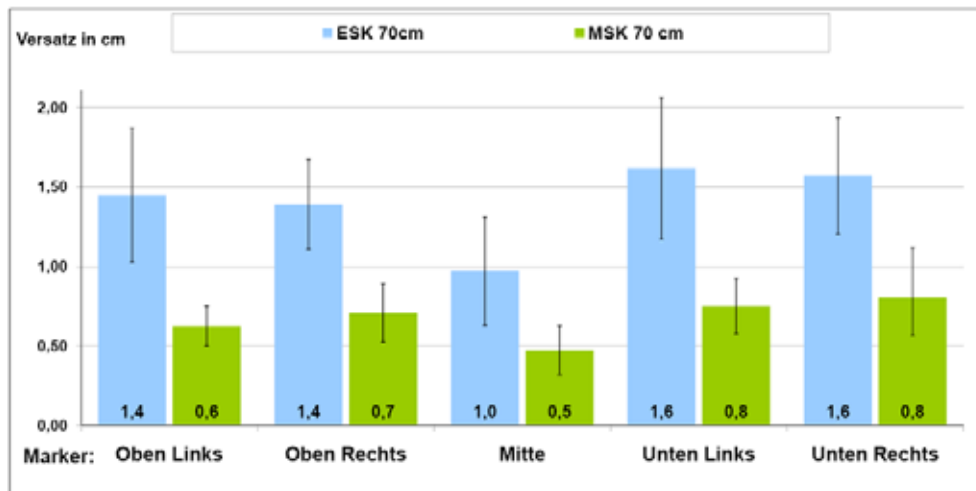


Abbildung 2: Mittlere Überlagerungsfehler sowie Standardabweichungen zwischen realen und virtuellen Markern in einem Testabstand von 70 cm. Die Markerpositionen entsprechen der Markeranordnung aus Abbildung 1, rechts.

Die Auswertung der eingesetzten Fragebögen ergab, dass beide Verfahren hinsichtlich des Schwierigkeitsgrades, der angezeigten Informationsmenge, der physischen Belastung, des verspürten Arbeitsaufwandes und der Frustration nicht signifikant unterschiedlich bewertet wurden. Die verspürte mentale Belastung war bei der ESK jedoch höher als bei der MSK Methode ($p < 0,05$, t-test). Weiterhin traten bei einigen Probanden Beschwerden im Kopf- oder Nackenbereich (Kopfschmerzen, Druckgefühl) nach 20-30 minütigem Tragen des OST-HMDs auf. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass von der Durchführung der Kalibrierung bis zum Ende der Messungen zur Überlagerungsgenauigkeit die das Display auf dem Kopf der Probanden möglichst nicht verschoben werden sollte.

3.6. Auswertung und Diskussion

Die Nutzerstudie bestätigte die Hypothese H1, dass die ESK deutlich schneller durchgeführt wurde als die MSK (Faktor 1,7). Im kalibrierten Bereich wurden keine signifikanten Unterschiede in der Überlagerungsgenauigkeit beider Verfahren festgestellt, so dass (H2) ebenfalls bestätigt wurde. Die Nutzerstudie zeigte, dass mittels der hier vorgestellten Durchführungsmethoden der STK Überlagerungsgenauigkeiten von ca. 0,5 cm erreichbar sind. Die Überlagerungsgenauigkeit außerhalb des kalibrierten Bereiches war bei der ESK geringer als bei der MSK. Die mittels der STK ermittelten 2-D Displaykoordinaten unterliegen einer Extrapolation, falls sich die 3-D Eingabewerte außerhalb des kalibrierten Bereiches befinden. Diese ist umso besser, je näher die 3-D Eingabewerte am Tiefenbereich der Kalibrierung liegen. Bei der ESK Methode betrug der mittlere Abstand zwischen der Testtafel in 70 cm Entfernung und Kalibrierbereich ca. 36 cm, bei der MSK Methode nur ca. 17 cm. Daher war der Kalibrierfehler der ESK in der Entfernung von 70 cm deutlich höher als der Kalibrierfehler der MSK. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass die Probanden den Abstand zu einem einzelnen realen Passpunkt schlechter abschätzen konnten als den Abstand zu einer Anordnung mit mehreren Passpunkten. Dies sollte bei der Auswahl einer geeigneten Kalibrierprozedur für Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen innerhalb des kalibrierten Bereichs berücksichtigt werden.

In diesem Versuch wurden nur in zwei Abständen Messungen zur Untersuchung der Überlagerungsgenauigkeit durchgeführt, da die Positionsangabe der virtuellen Rechtecke mittels Laserpointer zeitaufwendig war (ca. 10-15 Minuten pro Kalibriermethode). Eine Alternative zur Positionsangabe der virtuellen Marker würde die Verwendung eines Monitors darstellen, der in verschiedenen Entfernungen aufge-

stellt wird. Die Positionsangabe könnte dann mittels Mauseingabe erfolgen. Dies verspricht eine kürzere Testdauer, da das Anzeichnen des Laserpunktes durch einen Versuchsbetreuer entfällt. Dies setzt jedoch einen Monitor in ausreichender Größe voraus (mindestens 55 cm Bildschirmdiagonale bei einem Testabstand von 120 cm). Bei der Anzeige der Marker auf einem Bildschirm muss zudem sichergestellt werden, dass die genaue Größe der angezeigten Marker bekannt ist.

4. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine Nutzerstudie vorgestellt, in der zwei STK Durchführungsmethoden hinsichtlich Überlagerungsgenauigkeit und Durchführungsdauer verglichen wurden. Im Gegensatz zu Genauigkeitsuntersuchungen mittels Augkamera wurden nutzerbezogene Aspekte während der Kalibrierung berücksichtigt. Innerhalb des kalibrierten Bereiches traten keine signifikanten Unterschiede in der Überlagerungsgenauigkeit beider Verfahren auf. Die Durchführungsdauer der ESK war deutlich geringer als die der MSK. Weiterhin wurde der Kalibrierbereich bei der ESK Methode genauer eingehalten, als bei der MSK Methode. Die ESK wird für Anwendungsszenarien empfohlen, in denen eine schnelle Durchführung der STK erforderlich ist. Beide Verfahren sind für Anwendungsfälle geeignet, für die eine Überlagerungsgenauigkeit von 0,5 cm ausreichend ist. Weitere Arbeiten zur Optimierung der ESK sowie zur automatischen Erfassung und Kompensation des Verrutschens OST-HMDs sind geplant.

5. Fördervermerk

Die Arbeiten zur vorgestellten Thematik wurden teilweise vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (Fkz. 01IM08002A) gefördert.

6. Literatur

[TMX07] Tümler, J.; Mecke, R.; Xu, J.: See-Through Kalibrierverfahren für mobile Augmented Reality Assistenzsysteme. In: Augmented und Virtual Reality in der Produktentstehung, Bd. 6, Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 2007.

[TZO03] Tang, A.; Zhou, J.; Owen, C.: Evaluation of Calibration Procedures for Optical See-Through Head-Mounted Displays. In: ISMAR'03, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 2003.

[FMS93] Feiner, S.; Macintyre, B.; Seligmann, D. Knowledge-based Augmented Reality. In: Communications of the ACM. Volume 36, S. 53–62. ACM, New York, NY, USA, 1993.

[MGT+01] McGarrity, E.; Genc, Y.; Tuceryan, M.; Owen, C.; Navab, A. A new system for online quantitative evaluation of optical see-through augmentation. In: Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, S. 157–166, 2001.

[OZT+04] Owen, C.; Zhou, J.; Tang, A.; Xiao, F. Displayrelative calibration for optical see-through head-mounted displays. In ISMAR '04: Proceedings of the 3rd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, S. 70–78, Washington, DC, USA, 2004.

7. Autoren

Bacc. Jens Grubert
Hilfswissenschaftlicher Mitarbeiter

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung
Sandtorstraße 22
39106 Magdeburg

Telefon: 0391 40 90 715
Telefax: 0391 40 90 93715
E-Mail: jens.grubert@iff.fraunhofer.de

Dipl.-Ing.-Inf. Johannes Tümler
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung
Sandtorstraße 22
39106 Magdeburg

Telefon: 0391 40 90 106
Telefax: 0391 40 90 93715
E-Mail: johannes.tuemler@iff.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Rüdiger Mecke
Leiter Virtual Prototyping (VP)

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung
Sandtorstraße 22
39106 Magdeburg

Telefon: 0391 40 90 146
Telefax: 0391 40 90 115
E-Mail: ruediger.mecke@iff.fraunhofer.de