

Personenwiedererkennung mittels maschineller Lernverfahren für öffentliche Einsatzumgebungen

Markus Eisenbach¹

Abstract: Die erscheinungsbasierte Personenwiedererkennung in öffentlichen Einsatzumgebungen ist eines der schwierigsten, noch ungelösten Probleme der Bildverarbeitung. Viele Teilprobleme können nur gelöst werden, wenn Methoden des maschinellen Lernens mit Methoden der Bildverarbeitung kombiniert werden. Das entwickelte Verfahren zur erscheinungsbasierten Personenwiedererkennung wird exemplarisch anhand zweier Einsatzszenarien — Videüberwachung und Robotik — evaluiert. Die Qualität des umgesetzten Verfahrens wird anhand von zwölf Kriterien charakterisiert, die einen Vergleich mit biometrischen Verfahren ermöglichen. Durch den Einsatz maschineller Lernverfahren für alle Abarbeitungsschritte der erscheinungsbasierten Personenwiedererkennung wird in den betrachteten unüberwachten, öffentlichen Einsatzfeldern eine Erkennungsleistung erzielt, die sich mit biometrischen Verfahren messen kann.

1 Einleitung

Die heutige Zeit ist geprägt von einer Vielzahl technischer Neuerungen, die technischen Systemen ein immer höheres Maß an Autonomie ermöglichen. Unter anderem wird im Bereich der Pflege und Gesundheitsvorsorge verstärkt am Einsatz von Servicerobotern geforscht, welche zum Beispiel im häuslichen Umfeld bei der Betreuung von Demenzpatienten [Sc13], bei der Rehabilitation von Schlaganfallpatienten [Gr17b] oder bei der Rehabilitation von Patienten nach Hüftoperationen [Sc19] eingesetzt werden.

Um den Kontakt zwischen Mensch und Roboter aufrecht zu erhalten muss eine Wiedererkennung des Nutzers zu jeder Zeit möglich sein. Bei der Wiedererkennung des Nutzers im Gesundheits- und Pflegebereich gibt es jedoch einige Einschränkungen. Es ist zu beachten, dass es sich bei diesen Anwendungsbereichen um unkontrollierte Szenarien handelt. Dies bedeutet, dass keine ständige Kooperation der Personen erwartet werden kann, um zum Beispiel eine Erkennung anhand biometrischer Merkmale, wie Fingerabdruck oder Gesicht, zu ermöglichen. In diesen Anwendungsbereichen müssen technische Systeme daher auf die gesamte visuelle Erscheinung der Personen achten, inklusive deren Kleidung. [Go14b]²

Dies entspricht auch dem menschlichen Vorgehen, was anhand von Abb. 1 ersichtlich wird. Die Unterscheidung der drei Kinder wird deutlich erleichtert, wenn zusätzlich zum Gesicht auch die Kleidung betrachtet wird. Das gesamte Erscheinungsbild spielt also bei der menschlichen Wahrnehmung eine deutlich größere Rolle als einzelne biometrische Merkmale, wie beispielsweise das Gesicht.

In der Literatur ist diese erscheinungsbasierte Wiedererkennung von Personen durch ein technisches System wie folgt definiert:

¹ Fachgebiet Neuroinformatik und Kognitive Robotik, TU Ilmenau, markus.eisenbach@tu-ilmenau.de

² [Go14b], Preface, S. v



Abb. 1: Zuordnung von Personen anhand des Gesichts und der Kleidung. Bildquelle: [GC08]

„Personenwiedererkennung ist das Problem der Erkennung und Zuordnung einer Person an verschiedenen physischen Orten über die Zeit, nachdem die Person zuvor irgendwo anders visuell beobachtet wurde.“ [Go14b]³ Die „Hauptaufgabe der Personenwiedererkennung ist das Messen der Ähnlichkeit zwischen zwei personenzentrierten Bildregionen, um Vorhersagen zu ermöglichen, ob diese Regionen die gleiche Person darstellen trotz Veränderungen der Beleuchtung, des Blickwinkels, störender Hintergründe, Verdeckungen sowie unterschiedlicher Bildqualität und Auflösung.“ [MSJ14]⁴

Wie aus dem letzten Teil der Definition hervorgeht, soll die erscheinungsbasierte Wiedererkennung auch bei unterschiedlichen Umwelteinflüssen funktionieren, die jedoch oft nicht bekannt sind. Das heißt, die Wiedererkennung einer Person muss auch möglich sein

- wenn die Person nicht kooperiert und biometrische Merkmale der Person nicht erkennbar sind (unüberwachtes Szenario),
- wenn die Person teilweise oder zeitweise vollständig verdeckt ist (Verdeckung),
- wenn die Person aus verschiedenen Perspektiven beobachtet wird, das heißt zum Beispiel erst frontal, dann von hinten (Blickwinkel),
- wenn die Person in verschiedenen Posen beobachtet wird, zum Beispiel erst sitzend, dann stehend (Pose),
- wenn die Person weit von der Kamera entfernt ist und der Bildausschnitt daher nur niedrig aufgelöst ist (Auflösung),
- wenn die Bilder der Person unscharf sind, zum Beispiel durch die Bewegung der Kamera, die an einem mobilen Roboter angebracht ist (Bildqualität),
- wenn die Kleidung der Person durch wechselnde Beleuchtungsbedingungen oder Schattenwürfe unterschiedlich erscheint (Umwelteinflüsse) und
- wenn mehrere Personen ähnliche Kleidung tragen (Varianz).

Aufgrund dieser großen Herausforderung gilt die Personenwiedererkennung als eines der schwierigsten, noch ungelösten Probleme der Bildverarbeitung. Viele Teilprobleme können

³ [Go14b], Preface, S. v: engl. „Person re-identification is the problem of recognising and associating a person at different physical locations over time after the person had been previously observed visually elsewhere.“

⁴ [MSJ14], S. 23: engl. „[...] one key issue of person re-identification is [...] to measure the similarity between two person-centered image regions, allowing to predict if these represent the same person despite changes in illumination, viewpoints, background clutter, occlusion, and image quality/resolution.“

nur gelöst werden, wenn Methoden des maschinellen Lernens mit Methoden der Bildverarbeitung kombiniert werden. Dies wird auch deutlich anhand der relativ großen Anzahl an Publikationen in den letzten zehn Jahren zu diesem Thema in allen relevanten größeren Konferenzen und Journalen der beiden Forschungsbereiche. [Go14b]

2 Anwendungen

Das Lösen des Wiedererkennungsproblems stellt allein schon eine große Herausforderung dar. Zusätzlich bietet es laut [Go14a] auch noch ein enormes Potential für eine große Bandbreite praktischer Anwendungen. Im Rahmen dieser Arbeit werden exemplarisch zwei Anwendungsgebiete adressiert. Zum einen die Suche nach Personen in einem Multikamerasystem an öffentlichen Plätzen, zum anderen die Betreuung von Schlaganfallpatienten durch einen Serviceroboter. Beide Szenarien haben gemeinsam, dass Personen in Echtzeit visuell erfasst und durch Merkmale charakterisiert werden müssen, damit später eine Wiedererkennung ohne größeren Zeitaufwand stattfinden kann. Nachfolgend werden die beiden Anwendungen genauer beschrieben.

2.1 Videoüberwachung

Die Videoüberwachung von Flughäfen und Fluglandeplätzen wurde im Rahmen des Forschungsprojekts APFeI⁵ betrachtet. Das Ziel dieses Projekts war die Unterstützung eines Operators bei der kameraübergreifenden Verfolgung ausgewählter Personen. Ein unterstützendes Analysetool (Abb. 2) kann dabei helfen, eine ausgewählte Person im Blick zu behalten. Dabei sind Zeitpunkte, an denen die Zielperson vom System wiedererkannt wurde, grün hervorgehoben.

Viele Überwachungskameras sind so ausgerichtet, dass sie möglichst große Bereiche erfassen. Dadurch sind Details, wie das Gesicht, nicht erkennbar und können bei diesen Übersichtskameras auch nicht für die Erkennung von Personen verwendet werden. Die erscheinungsbasierte Wiedererkennung ist hierbei die entscheidende Komponente, um diesen Vorgang teilautomatisiert umzusetzen. Eine besondere Schwierigkeit stellen dabei Unterschiede in Beleuchtung und Blickwinkel dar.



Abb. 2: Anwendung der Wiedererkennung im Bereich Videoüberwachung.

⁵ APFeI: Analyse von Personenbewegungen an Flughäfen mittels zeitlich rückwärts- und vorwärtsgerichteter Videodatenströme. Forschungsprojekt gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N10797. Laufzeit: 01.01.2010 – 31.03.2014

Übertragbarkeit des Szenarios: Anhand dieses Forschungsprojekts wurde stellvertretend die Anwendung der Wiedererkennung zur Auswertung von Videos in einem Multikamerasystem untersucht. Daraus ergeben sich praktische Anwendungsmöglichkeiten für

- die Überwachung von kritischen Infrastrukturen, wie zum Beispiel Flughäfen, Bahnhöfen, U-Bahn-Stationen, Einkaufszentren, aber auch öffentlichen Plätzen,
- die Auswertung forensischer Daten,
- das Tracking von Personen über mehrere Räume in Smart-Home-Anwendungen und
- die Erfassung kundenspezifischer Informationen im Einzelhandel.

2.2 Nutzererkennung durch einen Serviceroboter

Im Rahmen des Forschungsprojekts ROREAS⁶ wurde ein Serviceroboter zur Begleitung und Unterstützung von Schlaganfallpatienten während ihrer Rehabilitation entwickelt. Damit der Roboter seinem aktuellen Nutzer folgen kann, muss er ihn von anderen Personen unterscheiden können. In eindeutigen Fällen kann der Nutzer dazu multimodal getrackt werden. Die erscheinungsbasierte Wiedererkennung ist wichtig, um den Patienten in Fluren mit hohem Personenaufkommen folgen zu können, auch wenn diese zwischenzeitlich vollständig verdeckt und somit für den Roboter nicht sichtbar waren (Abb. 3). Die größten Schwierigkeiten stellen dabei wechselnde Beleuchtungsbedingungen und teilweise Verdeckungen dar.



Abb. 3: Anwendung der Wiedererkennung im Bereich Servicerobotik.

Übertragbarkeit des Szenarios: Anhand dieses Forschungsprojekts wurde stellvertretend die Anwendung der Wiedererkennung in dem neuen Anwendungsfeld Servicerobotik untersucht. Dieses wurde bisher in der Literatur kaum betrachtet. Praktische robotische Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich für

- die Begleitung von Personen im medizinischen Kontext,
- das Lotsen von Personen in öffentlichen Einsatzumgebungen, wie zum Beispiel Einkaufszentren, Museen, Flughäfen oder Bürogebäuden und
- die Unterscheidung von Personen in Einsatzumgebungen mit eingeschränktem Nutzerkreis, wie zum Beispiel Seniorenresidenzen oder Smart-Home-Umgebungen.

⁶ ROREAS: Interaktiver Roboterischer Reha-Assistent für das Lauf- und Orientierungstraining von Patienten nach Schlaganfällen. Forschungsprojekt gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16SV6133. Laufzeit: 01.07.2013 – 31.03.2016

3 Zielstellung

Diese beiden Anwendungsszenarien — Videoüberwachung und Servicerobotik — haben gemeinsam, dass eine Wiedererkennung unter unkontrollierten Bedingungen (keine Kooperation der Personen) unter Einfluss verschiedener Umwelteinflüsse robust funktionieren muss. Hieraus leiten sich die Anforderungen an das Wiedererkennungssystem ab, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde:

- **Verwendung erscheinungsbasierter Merkmale**, die geeignet sind, um Personen anhand ihrer Kleidung wiederzuerkennen.
- **Echtzeitfähige Verarbeitung** aller Wiedererkennungsschritte bei gleichzeitiger Verwendung möglichst weniger Rechenressourcen, vor allem im Falle der Servicerobotik.
- **Bevorzugte Verwendung maschineller Lernverfahren** für alle Teilkomponenten der Wiedererkennung, um möglichst große Flexibilität und Praktikabilität zu erreichen.

Die Dissertation hatte entsprechend das Ziel des Entwurfs einer echtzeitfähigen erscheinungsbasierten Personenwiedererkennung, die flexibel für verschiedene Anwendungen einsetzbar ist.

4 Systemüberblick

Der generelle Ablauf der Wiedererkennung ist an die Verarbeitungskette in einem biometrischen System angelehnt (siehe Abb. 4). Zuerst werden zu erkennende Personen sensorisch über eine oder mehrere Kameras erfasst. Durch Vorverarbeitungsschritte lassen sich aus dem Ausgangsbild personenzentrierte Bildausschnitte extrahieren. Für die Merkmalsextraktion wird ein Neuronales Netzwerk derart trainiert, dass aus den Bildausschnitten diskriminative Merkmalsvektoren berechnet werden können, die ein schnelles Matching ermöglichen. Das generierte Template beschreibt die Zielperson anhand mehrerer Merkmalsvektoren. Es wird während des Matchings mit Merkmalsvektoren der zur Anwendungsphase beobachteten Personen verglichen. Eine gelernte Metrik kompensiert dabei szenariospezifische Umwelteinflüsse. Durch eine geeignete Fusion komplementärer

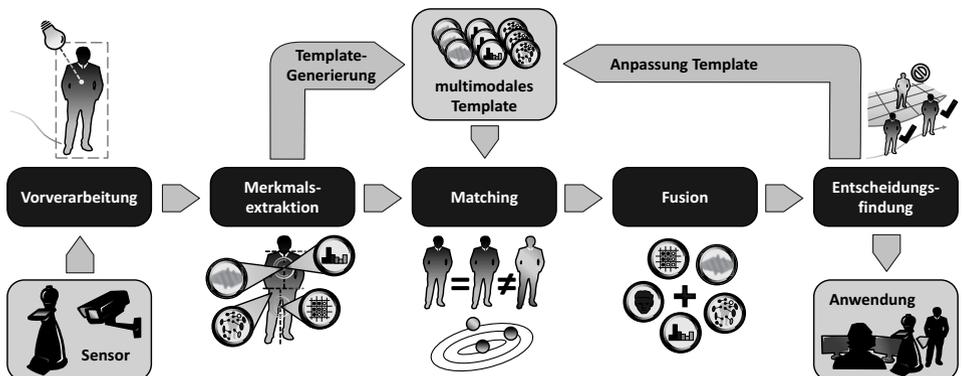


Abb. 4: Verarbeitungskette für echtzeitfähige Personenwiedererkennung.

Merkmale kann die Wiedererkennungseistung gesteigert werden. Bei der Entscheidungsfindung müssen alle berechneten Matching Scores verrechnet werden. Eine Suchraumeinschränkung kann dabei die Verarbeitungsgeschwindigkeit und die Erkennungseistung steigern.

Die eigentlichen Wiedererkennungsschritte — Merkmalsextraktion, Template-Generierung, Matching, Fusion und Entscheidungsfindung — finden sich auch in einem biometrischen System wieder. Durch den modularen Aufbau ist der Austausch von biometrischen Merkmalen gegen erscheinungsbasierte Merkmale ohne Probleme möglich. Außer für die Merkmalsextraktion können für alle Wiedererkennungsschritte Komponenten verwendet werden, die sowohl für die Verarbeitung biometrischer als auch erscheinungsbasierter Merkmale geeignet sind. Insbesondere durch Verfahren des maschinellen Lernens ist dies problemlos möglich.

5 Erreichte Verbesserungen gegenüber dem State of the Art

Schwerpunktmäßig wurde in dieser Arbeit untersucht, für welche Teilaspekte der Personenwiedererkennung Verfahren des maschinellen Lernens eingesetzt werden können und wie diese zu gestalten sind. Es wurden Fortschritte gegenüber dem State of the Art zu allen Teilaspekten des Wiedererkennungssystems erreicht:

- **Vorverarbeitung:** Durch den Einsatz von Convolutional Neural Networks konnte die Personendetektion deutlich verbessert werden [Ei16]. Der entwickelte Ansatz erzielt deutlich bessere Generalisierungseigenschaften in unbekanntem Einsatzgebiet als der State of the Art zur Detektion mittels neuronaler Netzwerke. Dies erhöht die Flexibilität bezüglich der Anwendungsszenarien. Eine Laufzeitoptimierung des Convolutional Neural Networks ermöglicht die Anwendung auf einer Jetson TX1 [Ei17] und somit den Einsatz auf einem Roboter.

Um Beleuchtungseinflüsse auf die Kleidungsfarbe wiederzuerkennender Personen zu korrigieren, wurde datengetrieben eine Beleuchtungskarte gelernt und bei verändernden Bedingungen adaptiert [Ei13]. Der vorgestellte Ansatz macht im Gegensatz zu den meisten State-of-the-Art-Verfahren zur Farbkonstanz keine Annahmen über die Einsatzumgebung und ist daher für ein reales Einsatzfeld besser geeignet.

- **Merkmalsextraktion:** Es wurde gezeigt, dass geeignete Merkmale für die Wiedererkennung rein datengetrieben gelernt werden können. Die Genauigkeit bei der Schätzung der mittels Convolutional Neural Networks gelernten semantischen Attribute übertraf für die meisten Attribute den State of the Art [Ei19].

Durch den Einsatz moderner Fehlerfunktionen konnten mit tiefen neuronalen Netzwerken Merkmalsvektoren gelernt werden, die eine sehr gute Unterscheidung von Personen ermöglichen [Ei19]. Aktuelle Softmax-Loss-Weiterentwicklungen wurden dabei erstmals im Kontext der erscheinungsbasierten Wiedererkennung verwendet. Die erzielten Wiedererkennungsraten liegen auf menschlichem Niveau, trotz einer im Vergleich zum State of the Art eher einfachen Netzwerkarchitektur.

- **Template-Generierung:** Es wurde ein Verfahren entwickelt, das zur Laufzeit für eine ausgewählte Person geeignete Merkmale auswählt, um diese Person von anderen zu unterscheiden [Ei12]. Dadurch kann das Template kompakt gehalten werden

und die Laufzeit sowie die Wiedererkennungsleistung verbessert werden. Einfache, personenspezifisch ausgewählte Merkmale waren komplexeren Merkmalen deutlich überlegen.

- **Matching:** Zur Verbesserung des Metric Learning wurde eine Vorverarbeitung der Trainingsdaten vorgestellt [Ei15b]. Außerdem wurde ein *Re-Ranking*-Verfahren entwickelt, das die Sortierung basierend auf Score-Werten auch ohne menschliche Rückmeldung verbessert [Ei19], was auch eine deutliche Verbesserung für die nachfolgende Fusion von Merkmalen bringt.
- **Fusion:** Die Fusion auf Score Level wurde erstmalig im Kontext der erscheinungsbasierten Wiedererkennung von Personen evaluiert [Ei15a]. Hierzu wurden zahlreiche State-of-the-Art-Verfahren verglichen und ein eigener Ansatz eingebracht, der das Fusionsergebnis deutlich verbessern kann. Außerdem erfolgte erstmalig eine Kombination von Score-Level-Fusion und Metric Learning, die eine (teilweise deutliche) Verbesserung der State-of-the-Art-Erkennungsraten erzielt.
- **Entscheidungsfindung:** Zur Entscheidung, welche Person der aktuelle Nutzer eines Roboters ist, wurde ein neuartiger Ansatz vorgestellt. Dieser berücksichtigt für mehrere Beobachtungen nicht nur die reinen Matching Scores, sondern rechnet diese geeignet in Wahrscheinlichkeiten um, bezieht zusätzlich Ranking-Informationen ein und entscheidet dann anhand eines probabilistischen Mehrheitsvotums [Ei15b]. Dieses konsistente probabilistische Framework stellt einen deutlichen Vorteil gegenüber den in der Literatur verwendeten einfachen Heuristiken dar.

Des Weiteren wurde die Entscheidungsfindung durch eine enge Kopplung mit dem Personentracking [We16] verbessert. Das Tracking zuvor identifizierter Personen ermöglichte eine spatio-temporale Suchraumeinschränkung für die Wiedererkennung. Dadurch konnte die Sicherheit bei der Wiedererkennung erhöht werden, wodurch das Template häufiger adaptiert werden konnte. Dies führte durch die größere Varianz der Ansichten wiederum zu besseren Wiedererkennungsraten.

- **Einbindung in Anwendung:** Es wurde erstmalig ein Wiedererkennungssystem realisiert, das in Echtzeit auf einem mobilen Roboter den aktuellen Nutzer anhand dessen Kleidung erkennt [Ei15b].

Bezüglich der Videoüberwachung konnte gezeigt werden, dass die erscheinungsbasierte Wiedererkennung eine kameraübergreifende Verfolgung von Personen ermöglicht und dazu führt, dass ein Operateur eine Situation deutlich schneller einschätzen kann [Ko13].

6 Bewertung und Fazit

Die Wiedererkennungsleistung kann auf Benchmarkdatensätzen anhand von erstellten Rankings bewertet werden, zum Beispiel anhand von CMC- oder SRR-Kurven. Diese häufig im State-of-the-Art anzutreffende Bewertung ist jedoch sehr einseitig, da sie zwar die Erkennungsleistung bewertet, jedoch die Praktikabilität des Ansatzes und die Skalierbarkeit außer Acht lässt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Wiedererkennungsleistung daher anhand von zwölf Gütekriterien bewertet, die auch für biometrische Merkmale angesetzt werden.

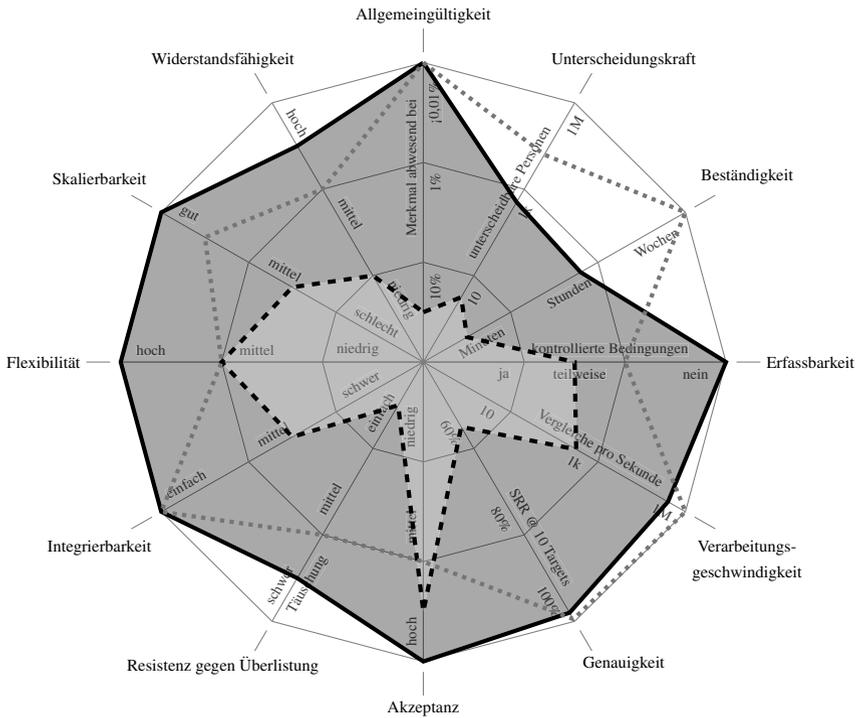


Abb. 5: Gütekriterien zur Beurteilung des Wiedererkennungssystems.

Neben den zwei Kriterien „Unterscheidungskraft“ und „Genauigkeit“, die sich auf die oben genannten Benchmarkergebnisse beziehen, wird die Wiedererkennungsleistung bezüglich zehn weiterer Kriterien bewertet (siehe Abb. 5). Die gestrichelte Linie zeigt das Ergebnis bei einer schlechten Wahl von Einzelkomponenten, die in der Literatur verwendet werden. Durch die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren konnten alle Gütekriterien deutlich verbessert werden (durchgezogene Linie). Tab. 1 zeigt, welche Teile des Wiedererkennungssystems einen Einfluss auf die einzelnen Gütekriterien ausüben.

Der exemplarische Vergleich mit einer Gesichtserkennung in den betrachteten Szenarien (gepunktete, grüne Linie in Abb. 5) zeigt, dass die erreichte Wiedererkennungsleistung für die meisten Kriterien auf dem Niveau biometrischer Merkmale liegt. Die in dieser Arbeit gelernten erscheinungsbasierten Merkmale erreichen bezüglich der Unterscheidungskraft das menschliche Niveau. Es können etwa 660 Personen eindeutig anhand ihrer Kleidung unterschieden werden. Damit wird jedoch nicht das Niveau einer Gesichtserkennung erreicht, durch die mehr als 10000 Personen eindeutig unterschieden werden können. Die Beständigkeit der erscheinungsbasierten Merkmale konnte durch mehrere Mechanismen auf die Aufenthaltsdauer der Person im Einsatzfeld gesteigert werden. Auch bewusste Kleidungswechsel werden durch ein Tracking und ein Template-Update geeignet behandelt. Die Beständigkeit biometrischer Merkmale über mehrere Jahre hinweg kann jedoch mit einer erscheinungsbasierten Wiedererkennung nicht erreicht werden.

	VORVERARBEITUNG	MERKMALSEXTRAKTION	TEMPLATE-GENERIERUNG	MATCHING	FUSION	ENTSCHEIDUNGSFINDUNG	EINBINDUNG IN ANWENDUNG
Allgemeingültigkeit	✓						
Unterscheidungskraft	✓			✓	✓		
Beständigkeit	✓	✓	✓	✓			
Erfassbarkeit	✓	✓			✓		
Verarbeitungsgeschwindigkeit		✓	✓	✓		✓	✓
Genauigkeit		✓	✓	✓	✓	✓	
Akzeptanz	✓	✓					✓
Resistenz gegen Überlistung	✓		✓		✓	✓	✓
Integrierbarkeit					✓		✓
Flexibilität							✓
Skalierbarkeit			✓	✓	✓	✓	✓
Widerstandsfähigkeit					✓		✓

Tab. 1: Verbesserung der Wiedererkennung durch in dieser Arbeit beschriebene Verfahren.

Literaturverzeichnis

- [Ei12] Eisenbach, M.; Kolarow, A.; Schenk, K.; Debes, K.; Groß, H.-M.: View Invariant Appearance-based Person Reidentification Using Fast Online Feature Selection and Score Level Fusion. In: IEEE Int. Conf. on Advanced Video and Signal-Based Surveillance (AVSS). IEEE, S. 184–190, 2012.
- [Ei13] Eisenbach, M.; Scheiner, P.; Kolarow, A.; Schenk, K.; Groß, H.-M.; Weinreich, I.: Learning Illumination Maps for Color Constancy in Person Reidentification. In: Workshop Farbbildverarbeitung (FWS). GFaI, S. 103–114, 2013.
- [Ei15a] Eisenbach, M.; Kolarow, A.; Vorndran, A.; Niebling, J.; Groß, H.-M.: Evaluation of Multi Feature Fusion at Score-Level for Appearance-based Person Re-Identification. In: IEEE Int. Joint Conf. on Neural Networks (IJCNN). IEEE, S. 469–476, 2015.
- [Ei15b] Eisenbach, M.; Vorndran, A.; Sorge, S.; Groß, H.-M.: User Recognition for Guiding and Following People with a Mobile Robot in a Clinical Environment. In: IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, S. 3600–3607, 2015.
- [Ei16] Eisenbach, M.; Seichter, D.; Wengefeld, T.; Groß, H.-M.: Cooperative Multi-Scale Convolutional Neural Networks for Person Detection. In: World Congress on Computational Intelligence (WCCI). IEEE, S. 267–276, 2016.
- [Ei17] Eisenbach, M.; Stricker, R.; Seichter, D.; Vorndran, A.; Wengefeld, T.; Groß, H.-M.: Speeding up Deep Neural Networks on the Jetson TX1. In: IJCNN-Workshop on Computational Aspects of Pattern Recognition and Computer Vision with Neural Systems (CAPRI). Springer, S. 11–22, 2017.
- [Ei19] Eisenbach, M.: Personenwiedererkennung mittels maschineller Lernverfahren für öffentliche Einsatzumgebungen. Dissertation, TU Ilmenau, 2019.
- [GC08] Gallagher, A.C.; Chen, T.: Clothing cosegmentation for recognizing people. In: IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). S. 1–8, 2008.

- [Go14a] Gong, S.; Cristani, M.; Loy, C.C.; Hospedales, T.M.: The Re-Identification Challenge. Springer, Kapitel 1, S. 1–20, 2014. Person Re-Identification.
- [Go14b] Gong, S.; Cristani, M.; Yan, S.; Loy, C.C.: Person Re-Identification. Springer, 2014.
- [Gr17a] Groß, H.-M.; Meyer, S.; Stricker, R.; Scheidig, A.; Eisenbach, M.; Müller, S.; Trinh, T.Q.; Wengefeld, T.; Bley, A.; Martin, C.; Fricke, C.: Mobile Robot Companion for Walking Training of Stroke Patients in Clinical Post-stroke Rehabilitation. In: IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, S. 1028–1035, 2017.
- [Gr17b] Groß, H.-M.; Scheidig, A.; Debes, K.; Einhorn, E.; Eisenbach, M.; Müller, S.; Schmiedel, T.; Trinh, T.Q.; Weinrich, C.; Wengefeld, T.; Bley, A.; Martin, C.: ROREAS: Robot Coach for Walking and Orientation Training in Clinical Post-Stroke Rehabilitation. Prototype Implementation and Evaluation in Field Trials. Autonomous Robots (AR), 41(3):679–698, 2017.
- [Ko13] Kolarow, A.; Schenk, K.; Eisenbach, M.; Dose, M.; Brauckmann, M.; Debes, K.; Groß, H.-M.: APFeL: The Intelligent Video Analysis and Surveillance System for Assisting Human Operators. In: IEEE Int. Conf. on Advanced Video and Signal-Based Surveillance (AVSS). IEEE, S. 195–201, 2013.
- [MSJ14] Ma, B.; Su, Y.; Jurie, F.: Discriminative Image Descriptors for Person Re-Identification. Springer, Kapitel 2, S. 23–42, 2014. Person Re-Identification.
- [Sc13] Schröter, C.; Müller, S.; Volkhardt, M.; Einhorn, E.; Huijnen, C.; van den Heuvel, H.; van Berlo, A.; Bley, A.; Groß, H.-M.: Realization and User Evaluation of a Companion Robot for People with Mild Cognitive Impairments. In: IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, S. 1145–1151, 2013.
- [Sc19] Scheidig, A.; Jäschke, B.; Schütz, B.; Trinh, T.Q.; Vorndran, A.; Mayfarth, A.; Groß, H.-M.: May I Keep an Eye on Your Training? Gait Assessment Assisted by a Mobile Robot. In: Int. Conf. on Rehabilitation Robotics (ICORR). IEEE/RAS-EMBS, 2019.
- [SSE19] Sesselmann, M.; Stricker, R.; Eisenbach, M.: Einsatz von Deep Learning zur automatischen Detektion und Klassifikation von Fahrbahnschäden aus mobilen LiDAR Daten. AGIT – Jour. für Angewandte Geoinformatik, 2019.
- [We16] Wengefeld, T.; Eisenbach, M.; Trinh, T.Q.; Groß, H.-M.: May I be your Personal Coach? Bringing Together Person Tracking and Visual Re-identification on a Mobile Robot. In: Int. Symposium on Robotics (ISR). VDE, S. 141–148, 2016.



Markus Eisenbach schloss 2009 sein Studium an der TU Ilmenau als Diplom-Informatiker ab. Anschließend arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Neuroinformatik und Kognitive Robotik der TU Ilmenau. Seine Promotion zum Doktor-Ingenieur schloss er 2019 mit dem Prädikat „Summa cum laude“ ab. Seit 2019 leitet er die Nachwuchsforscherguppe „Maschinelles Lernen“. Seine Forschungsschwerpunkte umfassen maschinelles Lernen, Deep Learning, Robotik sowie Automatisierung von Bild- und Signalverarbeitung in industriellen Anwendungen. Auszeichnungen: 2014 wurde er für besondere Leistungen im Ehrenamt ausgezeichnet. Für seine

Lehrtätigkeiten an der TU Ilmenau bekam er mehrere Preise: Die Lehrveranstaltung „Angewandte Neuroinformatik“ wurde 2016, 2017 und 2019 auf Grundlage von Studienendbewertungen als bestes Seminar der Fakultät für Informatik und Automatisierung ausgezeichnet. 2019 bekam er den Lehrpreis der TU Ilmenau verliehen. Folgende Publikationen wurden ausgezeichnet: Auf der International Conference on Robotics and Automation (ICRA) war [Gr17a] Finalist des Best Paper Awards on Human-Robot Interaction (HRI). Der Beitrag [SSE19] wurde mit dem Best Student Paper Award ausgezeichnet.