

Konzeption eines adaptionsfähigen menschenzentrierten Montagesystems auf der Basis markerloser sensorischer Mitarbeitererfassung

Paul Hubert HAAS, Lennard MARGIES, Rainer MÜLLER

*Forschungsbereich Montagesysteme,
Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) gGmbH,
Eschberger Weg 46, D-66121 Saarbrücken*

Kurzfassung: Die Herausforderungen der modernen Produktion bedingen, dass der Mensch auch weiterhin elementarer Bestandteil der industriellen Montage bleiben wird. Um dabei einen möglichst ergonomischen und produktiven Einsatz der menschlichen Arbeitskraft zu ermöglichen, gewinnt der Aspekt der Menschzentrierung zunehmend an Bedeutung. Im Rahmen des Beitrags wird ein Konzept für ein entsprechendes menschenzentriertes Montagesystem vorgestellt. Dieses besitzt dabei sowohl die Fähigkeit zur Anpassbarkeit als auch zu einer zugehörigen Anpassungsunterstützung in den Dimensionen Arbeitshöhe und Blick- und Greifbereich/Händigkeit. Grundlage für diese Unterstützung bildet die markerlose Erfassung menschlicher Bewegungs- und Tätigkeitsdaten während der Montage durch im und um das Montagesystem installierte Kamera- und Sensortechnik.

Schlüsselwörter: Menschzentrierung, Adaptionsfähige Montagesysteme, Arbeitsplatzgestaltung, Motion Capture

1. Einleitung

Die moderne industrielle Produktion ist geprägt durch kürzer werdende Produktlebenszyklen sowie einer steigenden Produktvarianz und -individualität (Reinhart & Zühlke 2017). Insbesondere in der Montage als finalem Glied der Produktion führt dies zu einem zunehmenden Grad an Komplexität und Dynamik. Diese Herausforderungen bedingen, dass der Produktionsfaktor Mensch aufgrund seiner flexibel einsetzbaren motorischen und kognitiven Fähigkeiten (Lotter 2012) trotz fortschreitender Automatisierung weiterhin elementarer Bestandteil der industriellen Montage bleibt. Um diesen dabei möglichst nachhaltig und menschengerecht einzusetzen, verlagert sich der Fokus bei der Gestaltung und dem Betrieb von Montagesystemen verstärkt von der Technik- hin zur Menschzentrierung (May et al. 2015). Ziel ist der langfristige Erhalt der Arbeitsfähigkeit von Produktionsmitarbeitenden durch einen beanspruchungsoptimierten Einsatz (Nitsch 2020). Die Montage soll somit produktiver und ergonomischer werden.

Entsprechende Montagesysteme sollten sowohl die Fähigkeit zur nutzerspezifischen Anpassbarkeit im Sinne der Verhältnisergonomie als auch zum adressatenbezogenen Nutzerfeedback im Sinne der Verhaltensergonomie besitzen.

Im vorliegenden Beitrag wird ein Konzept zur Realisierung eines solchen Montagesystems vorgestellt.

Ausgangspunkt bildet die Definition der adaptionsbedürftigen Parameter eines Montagesystems im Kontext der Menschzentrierung und der zugehörigen Nutzerdaten. Darauf basierend wird dargestellt, wie diese Daten innerhalb eines Montageprozesses erfasst und in den digitalen Zwilling integriert werden können, um diese anschließend zu verarbeiten. Dies bildet die Grundlage, um im Folgenden die zuvor definierten Parameter des Montagesystems menschengerecht anzupassen.

2. Grundlagen und Stand der Wissenschaft

2.1 Adaptionsbedürftige Parameter eines Montagesystems

Ein menschenzentriertes Montagesystem sollte insoweit adaptionsfähig sein, dass es auf die spezifischen Merkmale bzw. Eigenschaften eines jeden Nutzers reagieren kann. Solche menschen-spezifischen Merkmale bzw. Eigenschaften lassen sich nach May et al. (2015) in die vier Dimensionen Anthropometrie, funktionale Fähigkeiten (physisch, sensorisch, kognitiv), Wissen und persönliche Bedürfnisse aufteilen. Daraus folgt, dass ein menschenzentriertes Montagesystem sowohl hinsichtlich der physiologischen (z. B.: Körpergröße, Schulterhöhe, Sitz- und Stehfertigkeit) als auch der kognitiven Charakteristika (z. B.: Wahrnehmungs- und Verarbeitungsfähigkeit) eines jeden Nutzers individualisierbar sein sollte.

Eine Synopsis entsprechender montagesystemseitiger Individualisierbarkeitsgrößen wurde durch Schlund et al. (2018) vorgestellt. Dabei wurden sieben Individualisierbarkeitsdimensionen sowie zugehörige Montagesystemeinstellgrößen identifiziert. Für die weiteren Betrachtungen sind dabei lediglich die nicht mitweltbezogenen Dimensionen von Interesse, da das im Rahmen des Beitrags zu konzipierende Montagesystem als umweltlose Entität betrachtet wird. Dementsprechend sind für die Konzepterstellung die in Tabelle 1 dargestellten Individualisierbarkeitsdimensionen samt zugehöriger Einstellgrößen relevant.

Tabelle 1: Relevante Individualisierbarkeitsdimensionen und zugehörige Einstellgrößen (in Anlehnung an (Schlund et al. 2018))

Dimension	Arbeitshöhe	Blick- und Greifbereich, Händigkeit
Einstellgrößen	Höhe der Arbeitsfläche Variation Sitz-/Steharbeitsplatz	Größe und Neigung Arbeitsfläche Material-/Werkzeuggestellung

2.2 Menscherfassung im Kontext der industriellen Montage

Damit eine optimale Einstellung der benannten Montagesystemgrößen gewährleistet werden kann, sollte ein menschenzentriertes Montagesystem die Fähigkeit zur Einstellungsunterstützung besitzen. Ergo gilt es, die dafür grundlegenden Menschdaten, diese umfassen Tätigkeits- und Bewegungsdaten, während der Montage zu erfassen.

Zur Tätigkeitsdatenerfassung bedarf es mindestens des Trackings der menschlichen Handpositionen und -bewegungen während der Montage. Dieses kann dabei mittels an den Händen verorteter selbst erfassender Technologien, wie Datenhandschuhen, an den Händen verorteter erfassungsunterstützender Technologien, wie Markern oder ohne an den Händen verorteter Technologien, also markerlos erfolgen

(Chen et al. 2020). Sowohl markerbasierte als auch markerlose Konzepte benötigen eine externe Erfassungstechnik. Dabei handelt es sich in den meisten Fällen um Kamerasysteme.

Im Rahmen der Bewegungsdatenerfassung gilt es im Gegensatz zur Tätigkeitsdatenerfassung nicht nur, die wirklichen Montageabläufe wie z. B. Hinlangen, Greifen und Fügen zu erfassen, sondern auch die gesamtmotorischen Abläufe. Analog zu den Erläuterungen hinsichtlich der Tätigkeitsdatenerfassung ist auch dabei eine Differenzierung in Verfahren mit am Menschen fixierten Sensoren bzw. Markern und markerlosen Verfahren möglich. Bei Motion Capturing Anwendungen im industriellen Umfeld kommen aktuell zumeist wearablebasierte Erfassungskonzepte zum Einsatz. (Menolotto et al. 2020) Aufgrund der immensen Fortschritte im Bereich der Tiefenbildkameratechnik und des maschinellen Sehens gewinnen markerlose Erfassungssysteme allerdings zunehmend an Relevanz (Brunner et al. 2022). Technologien ohne körperbefestigte Sensoren bedürfen keiner speziellen Einrüstung der Produktionsmitarbeitenden und sind daher anwenderfreundlicher und vielseitiger einsetzbar (Mündermann et al. 2006). Aufgrund dieser Vorteile werden im Rahmen der Konzepterstellung ausschließlich markerlose Erfassungstechnologien berücksichtigt

3. Konzeption des Montagesystems

3.1 Konzeption und Aufbau des Montagesystems

Die Erfassung der zuvor dargelegten relevanten Menschdaten kann in zwei Erfassungsdimensionen differenziert werden. Dies sind die Dimensionen Montageprozessraum und Arbeitsraum, dargestellt in Abbildung 1.

Im Rahmen der Erfassung des Montageprozessraums wird die benannte Tätigkeitsdatenerfassung zusätzlich zum Handtracking um ein Kopftracking erweitert, um den ergonomisch relevanten Aspekt der Blickbereiche zu adressieren. Dementsprechend besitzt das Montagesystem zum einen eine im Montagtischausleger (1) arretierte, nach unten gerichtete Tiefenbildkamera (2) zur Erfassung der Handbewegungen. Zum anderen ist eine Tiefenbildkamera (3) zur Beobachtung der Kopfbewegungen verbaut. Dabei kann je nach Größe des Montageprozessraums und des Kamerasichtfelds die Notwendigkeit zum Einbau weiterer Kameras zur vollständigen Montageprozessraumüberdeckung gegeben sein.

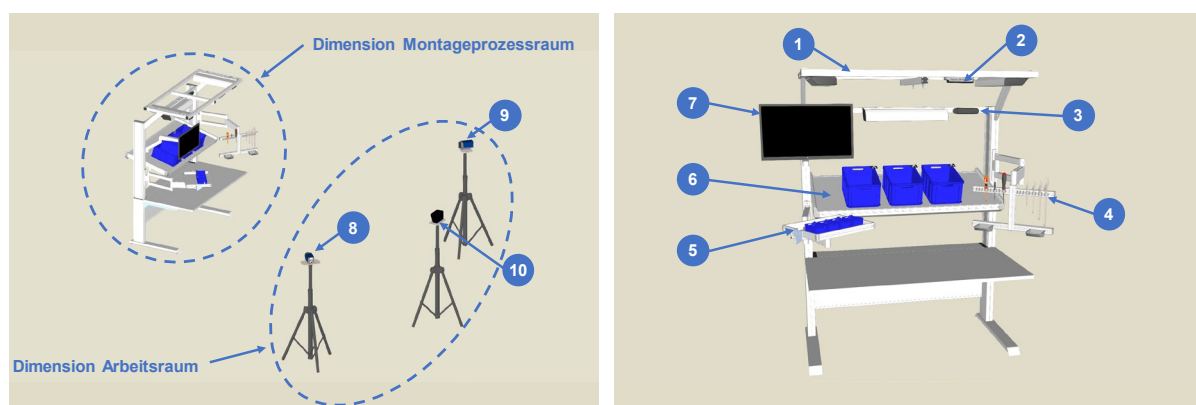


Abbildung 1: Darstellung des Gesamtaufbaus des konzipierten Montagesystems (links) und der spezifischen Dimension Montageprozessraum (rechts)

Um im Montageprozessraum eine anpassbare Material- und Werkzeugbereitstellung zu gewährleisten, sind für die Bereitstellung leichter Bauteile und Werkzeuge Schwenkarmmodule (4, 5) vorgesehen. Schwerere Bauteile werden mittels eines Tablett (6) bereitgestellt. Des Weiteren besitzt das Montagesystem eine Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Kommunikation mit dem Montagesystemnutzer. Dies kann beispielsweise ein touchscreenbasierter Monitor (7) sein. Dort wird dem Montagesystemnutzer, wie in Abbildung 2 dargestellt, in Form eines Feedbacks aufgezeigt, wie die Ergonomie und Produktivität der Montageprozesse durch die Anpassung definierter Montagesystemparameter gesteigert werden können.

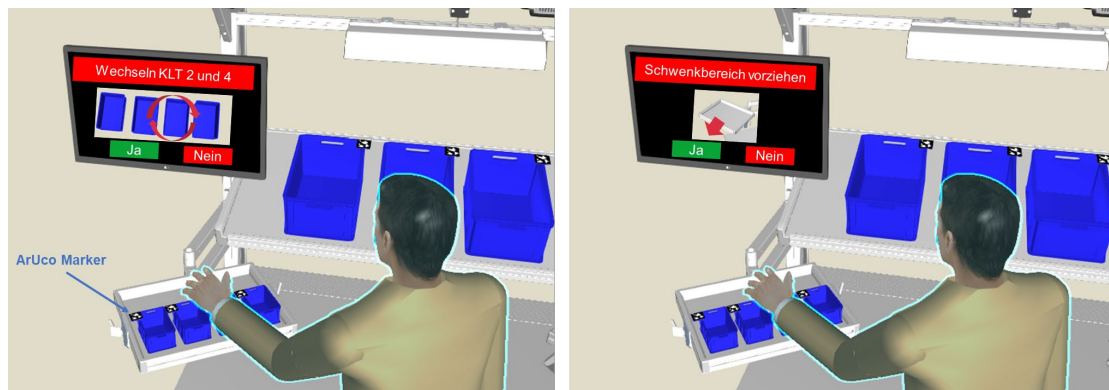


Abbildung 2: Darstellung von Optimierungsempfehlungen mittels Monitor, z. B. für eine verbesserte Ladungsträgerpositionierung (links) oder Schwenkarmanordnung (rechts)

In Bezug auf die Individualisierbarkeitsdimension Blick- und Greifbereich/Händigkeit können auf der Grundlage der durch die benannten Tiefenbildkameras erfassten Nutzerdaten Vorschläge zur Optimierung der Tischneigung und der Material-/Werkzeugbereitstellung ausgegeben werden. Dies umfasst im Rahmen der Material-/Werkzeugbereitstellung sowohl Vorschläge für die Optimierung der Schwenkarmpositionierung als auch für die Ladungsträgeranordnung auf dem Schwenkarmmodul und Tablett. Nimmt der Mitarbeiter einen generierten Vorschlag an, wird dessen richtige Umsetzung mittels der benannten Tiefenbildkameras geprüft. Um dabei die Positionen der Ladungsträger und Schwenkarmmodule erfassen zu können, sind diese jeweils mit Referenzmarken in Form von ArUco-Markern versehen. Somit wäre das Verschieben von Ladungsträgern auch im Fall des Einsatzes einer Pick-by-Light-Assistenz unkritisch, da dennoch jedem Ladungsträger die richtige Position zugeordnet werden kann.

In der Dimension Arbeitsraum erfolgt die Erfassung durch zwei 2D-Industriekameras (8, 9) und einen LiDAR (10). Trotz der zunehmenden Forschungsaktivitäten im Bereich der Nutzung von Tiefenbildkameras zur Ergonomiebewertung (Brede et al. 2020; Kim et al. 2021) wird arbeitsraumdimensional auf deren Nutzung verzichtet. Dies liegt vor allem in der begrenzten Reichweite entsprechender Tiefenbildsysteme begründet (Kudan 2020). Durch die Kombination von Kameratechnik und LiDAR-Sensorik kann ein robusteres und präziseres Gesamtsystem zur arbeitsraumdimensionalen Erfassung geschaffen werden, da die Schwächen der Einzeltechnologien kompensiert werden. So ist die Erfassungsqualität bei LiDAR-Sensoren nicht von der Beleuchtung abhängig. Bei der Nutzung von Kameras besteht der Vorteil, dass sich diese durch die Fähigkeit zur Farb- und Konturerkennung besser für Aufgaben der Objektdetektion und -identifikation eignen. (Mugunthan et al. 2020) Um

eine möglichst stabile und genaue Erfassung des Menschen innerhalb des Arbeitsraums zu gewährleisten, werden die generierten Kamera- und LiDAR-Daten in Form einer Sensordatenfusion zusammengeführt. Auf der Basis dieses Datensatzes gilt es, die ergonomische Gesamtsituation zu bewerten und entsprechende Verbesserungspotenziale, diese können sowohl verhältnis- als auch verhaltensergonomischer Natur sein, abzuleiten. Diese werden zum Montagesystemnutzer wiederum über den benannten Monitor kommuniziert.

3.2 Datenverarbeitung mittels Digitalem Zwilling

Die Generierung des etwaigen Optimierungsbedarfes wird in einem Digitalen Zwilling von Mensch und Montagesystem durchgeführt. Im ersten Schritt gilt es auf der Basis der erfassten Kamera- und LiDAR-Daten die Position der für die folgenden Betrachtungen relevanten Körperobjekte zu bestimmen. Dies betrifft Gelenk-, Hand- und Kopfpositionen. Die Bestimmung erfolgt dabei durch die Nutzung von neuronalen Netzen zur Objekterkennung. Die Resultate erster Versuche (Abbildung 3) zur Detektierbarkeit von Gelenken auf der Basis von Kameradaten mittels des Algorithmus OpenPose (Cao et al. 2021) bestätigen die grundsätzliche Machbarkeit.



Abbildung 3: Proof-of-Concept zur Gelenkdetektierbarkeit (rechts) aus 2D-Kamerabildern (links)

Die ermittelten Positionsdaten bilden die Grundlage für die intervallartige Bestimmung von Bewegungstrajektorien und -haltungen. Diese werden im Anschluss durch den Abgleich mit normbasierten Soll-Vorgabewerten oder durch den Einsatz von Methoden der Künstlichen Intelligenz auf mögliche Optimierungen untersucht. Ziel ist die Ermittlung der optimalen Montagesystemparameter, z. B. hinsichtlich der Position von Ladungsträgern, der Anstellung des Tisches oder der Tischhöhe. Die ermittelten Optimalparameter gilt es in Form eines Soll-/Ist-Vergleichs den Realparametern des Montagesystems gegenüberzustellen. Bei der Feststellung von Abweichungen erfolgt ein entsprechender Anpassungsvorschlag an den Montagesystemnutzer.

4. Diskussion

Das im Beitrag vorgestellte Montagesystem besitzt die Fähigkeit zur menschenzentrierten Anpassbarkeit als auch zur zugehörigen Anpassungsunterstützung auf der Basis einer Mitarbeitererfassung. Dabei konnte dargestellt werden, dass diese Erfassung konzeptionell vollständig ohne körperbefestigte Marker oder Wearables möglich ist. Die grundsätzliche Möglichkeit zur markerlosen Bewegungsdatenerfassung konnte anhand erster Versuchsergebnisse validiert werden. Entsprechende

Versuche erweitert um den Aspekt der Tätigkeitsdatenerfassung werden im Verlauf der weiteren Forschungsarbeit vertieft.

Des Weiteren wird untersucht, inwieweit die nicht betrachteten mitweltbezogenen Individualisierbarkeitsdimensionen, wie die Beleuchtung und die akustische Situation in das Konzept integriert werden können.

Einen weiteren Schwerpunkt zukünftiger Forschung bildet die prädiktive Montage-systemanpassung. Dabei soll ausgehend vom Arbeitsplan bereits vor der Montage eine Empfehlung zur Greifbereichsoptimierung generiert werden. Dies ist insbesondere bei der variantenreichen Montage von Relevanz.

Zusätzlich soll im Rahmen der weiteren Forschung der Aspekt der Produktionssicherheit adressiert werden. Dabei soll untersucht werden, inwieweit die vorgestellte Lösung für eine Gefahren- und Anomalieerkennung eingesetzt werden kann.

Außerdem soll eruiert werden, inwieweit die in Abschnitt 3.1 vorgestellte Tiefenbildkamera zur Kopfbewegungserfassung für die Bewertung der kognitiven Belastung während der Montage genutzt werden kann und welche Schlüsse daraus für die Anpassung des Montagesystems gezogen werden können.

5. Literatur

- Brede S, Gohlke J, Reichert S (2020) Ergonomiebewertung per 3D-Kamera. *f + h fördern und heben* 69 (3): 68–71.
- Brunner O, Mertens A, Nitsch V, Brandl C (2022) Accuracy of a markerless motion capture system for postural ergonomic risk assessment in occupational practice. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* 28 (3): 1865–1873.
- Cao Z, Hidalgo G, Simon T, Wei SE, Sheikh Y (2021) OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 43 (1): 172–186.
- Chen W, Yu C, Tu C, Lyu Z, Tang J, Ou S, Fu Y, Xue Z (2020) A Survey on Hand Pose Estimation with Wearable Sensors and Computer-Vision-Based Methods. *Sensors* 20 (4): 1074.
- Kim W, Sung J, Saakes D, Huang C, Xiong S (2021) Ergonomic postural assessment using a new open-source human pose estimation technology (OpenPose). *International Journal of Industrial Ergonomics* 84 :103164
- Kudan (2020): Depth cameras and RGB-D camera SLAM. Accessed Dec 20, 2022. <https://www.kudan.io/blog/depth-cameras-and-rgb-d-slam/>.
- Lotter B (2012) Manuelle Montage von Kleingeräten. In: Lotter B, Wiendahl HP (Hrsg.) *Montage in der industriellen Produktion*, 2. Auflage Berlin, Heidelberg: VDI-Buch. Springer, 109–146.
- May G, Taisch M, Bettoni A, Maghazei O, Matarazzo A, Stahl B (2015) A New Human-centric Factory Model. *Procedia CIRP* 26: 103–108.
- Menolotto M, Komaris DS, Tedesco S, O'Flynn B, Walsh M (2020) Motion Capture Technology in Industrial Applications: A Systematic Review. *Sensors* 20 (19): 5687.
- Mugunthan N, Balaji SB, Harini C, Naresh VH, Prasanna Venkatesh V (2020) Comparison Review on LiDAR vs Camera in Autonomous Vehicle. *International Research Journal of Engineering and Technology* 7 (8): 4242–4246.
- Mündermann L, Corazza S, Andriacchi TP (2006) The evolution of methods for the capture of human movement leading to markerless motion capture for biomechanical applications. *Journal of Neuro-Engineering and Rehabilitation* 3: 6–17.
- Nitsch V (2020) Auswirkungen der Digitalisierung auf die Sicherheit: Die „Human Factors“ Perspektive. In: Nießen N, Hermes G, Kramer U, Eisenbahn-Bundesamt Bonn (Hrsg.) *2. Fachtagung Eisenbahnrecht und Technik*. Aachen: RWTH Aachen University, 17–35.
- Reinhart G, Zühlke D (2017) Von CIM zu Industrie 4.0. In: Reinhart G (Hrsg.) *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*, 1. Auflage München: Hanser, XXXI–XL.
- Schlund S, Mayrhofer W, Rupprecht P (2018) Möglichkeiten der Gestaltung individualisierbarer Montagearbeitsplätze vor dem Hintergrund aktueller technologischer Entwicklungen. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaften* 72 (4): 276–286.



Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Nachhaltig Arbeiten und Lernen

**Analyse und Gestaltung lernförderlicher
und nachhaltiger Arbeitssysteme
und Arbeits- und Lernprozesse**

69. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

01. – 03. März 2023

GfA-Press

Bericht zum 69. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 01. – 03. März 2023

**Fakultät Maschinenbau, Institut für Berufswissenschaften der Metalltechnik (IBM) und
Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA), Leibniz Universität Hannover**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Sankt Augustin: GfA-Press, 2023
ISBN 978-3-936804-32-4

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle (s. u.) erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© GfA-Press, Sankt Augustin

Schriftleitung: Prof. Dr. Rolf Ellegast

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Kongressband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Geschäftsstelle der GfA

Simone John, Tel.: +49 (0)30 1300-13003

Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin

info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de · www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de

Screen design und Umsetzung

© 2023 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de