

Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure zur ergonomischen Prognose in der Digitalen Fabrik

Gert ZÜLCH¹, Martin LIEDTKE²

*¹ Karlsruher Institut für Technologie
Silvanerweg 10, D-76356 Weingarten (Baden)*

*² Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung
Alte Heerstrasse 111, D-53757 Sankt Augustin*

Kurzfassung: Seit einigen Jahren befasst sich der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) mit der Belastung und Beanspruchung des arbeitenden Menschen, um diese in Simulationsverfahren und Werkzeugen der Digitalen Fabrik zu prognostizieren. Derartige Verfahren unterstützen nicht nur die Planung von Arbeitssystemen, sondern helfen auch beim prospektiven Arbeits- und Gesundheitsschutz. Die Entwicklung begann im Jahre 2001 mit dem VDI-Richtlinienblatt 3633-6, das auf die Abbildung des Personals bei der Simulation von Produktionssystemen abzielt. Im Jahre 2015 folgte das Richtlinienblatt VDI 4499-4, in dem anthropometrische und arbeitsphysiologische Aspekte in der Digitalen Fabrik behandelt werden. Gemäß dem Belastungs-Beanspruchungs-Konzept greift der vorliegende Beitrag mit dem neuen Richtlinienblatt VDI 4499-5 nun die Prognose physikalischer Umgebungseinflüsse auf. Dabei ergibt sich für die Arbeitswissenschaft eine Vielzahl von Aufgaben, bis die Vision der virtuellen ergonomischen Prognose Realität werden kann.

Schlüsselwörter: Prognoseverfahren, Arbeits- und Gesundheitsschutz, Simulation, Anthropometrie, Arbeitsphysiologie, Umgebungseinflüsse

1. Problemstellung der behandelten VDI-Richtlinienblätter

Bei der Planung neuer Produktionssysteme spielen Softwareverfahren heutzutage eine wichtige Rolle, lassen sich doch die Vorzüge oder auch Schwächen einer möglichen Gestaltung bereits vor der Realisierung erkennen. Seit vielen Jahren werden dazu Simulationsverfahren eingesetzt, die in letzter Zeit zunehmend durch Werkzeuge der Digitalen Fabrik ergänzt werden.

Stellt man jedoch die Frage nach dem Einfluss des Menschen auf die Produktivität eines Arbeitssystems und welchen Einfluss Produktionseinrichtungen und Arbeitsumgebung auf den arbeitenden Menschen hat, so bleiben viele Fragen in der virtuellen Welt unbeantwortet. Während die produktionslogistische Simulation von Arbeitssystemen in der Praxis einen gewissen Stand erreicht hat, trifft dies in Bezug auf die Ergonomie viel weniger zu.

In den vorhandenen Werkzeugen der Digitalen Fabrik werden vorwiegend anthropometrische und arbeitsphysiologische Aspekte aufgegriffen. Betrachtet man jedoch die Wirkung von Umgebungseinflüssen auf den arbeitenden Menschen, so stößt man auf nur wenige Beispiele zur ergonomischen Prognose. Dies ist insofern kritisch zu betrachten, als derartige Verfahren für den prospektiven Arbeits- und Gesundheitsschutz von großer Bedeutung sein können.

Zwar gibt es in der International Ergonomics Association ein Technical Committee „Digital Human Modeling and Simulation“, dieser Fachkreis befasst sich aber vorrangig mit der biomechanischen Menschmodellierung (siehe z.B. Briceno & Paul 2018). Auch in internationalen Ergonomiekongressen (z.B. Nunes 2019) und in neueren englischsprachigen Veröffentlichungen (z.B. Neumann et al. 2021) finden sich kaum Hinweise hierauf. Im deutschsprachigen Bereich gibt es ebenfalls nur wenige Veröffentlichungen, die auf die Bedeutung der Prognose von Umgebungseinflüssen hinweisen (siehe zu einer Ausnahme Illmann et al. 2015).

Die hier behandelten Richtlinienblätter wurden als Bestandteil von VDI-Richtlinien zur produktionslogistischen Simulation und zur Digitalen Fabrik entwickelt. Der zuerst genannte Verfasser war bzw. ist der Vorsitzende der jeweils zu deren Entwicklung beauftragten Richtlinienausschüsse, der an zweiter Stelle genannte ist stellvertretender Vorsitzender des hier zuletzt aufgeführten Richtlinienausschusses.

2. Makroergonomische Aspekte in der produktionslogistischen Simulation

Den Anfang dieser Entwicklung bildete im Jahre 2001 die VDI-Richtlinie 3633-6 zur Abbildung des Menschen in Simulationsverfahren. Zielrichtung war es dabei, aus makroergonomischer Sicht den Einfluss des Personals auf die Leistungsfähigkeit eines Arbeitssystems zu prognostizieren. Zur Bewertung wurden produktionslogistische Kriterien herangezogen, wie zum Beispiel der Produktionsausstoß und die zeitliche Auslastung des Personals. Gegenstand der Analyse war vor allem die Anzahl und Qualifikation der fiktiv eingesetzten Mitarbeiter. Die produktionslogistische Bewertung von Arbeitssystemen beginnt sich allmählich in der betrieblichen Praxis durchzusetzen. Daher wurde inzwischen mit der Überarbeitung dieses Richtlinienblattes begonnen.

Abbildung 1 zeigt hierzu eine Simulationsuntersuchung unterschiedlicher Personalstrukturen aus Fertigungs- und Instandhaltungsmitarbeitern in einer Umformfertigung. Unter Verwendung einer Planungsheuristik konnten mit Hilfe der Simulation Lösungen mit höher qualifizierten Fertigungsmitarbeitern gefunden werden, die in Bezug auf die gesetzten Ziele einen guten Kompromiss ermöglichten (Zülch & Vollstedt 2017, S. 8 ff.).

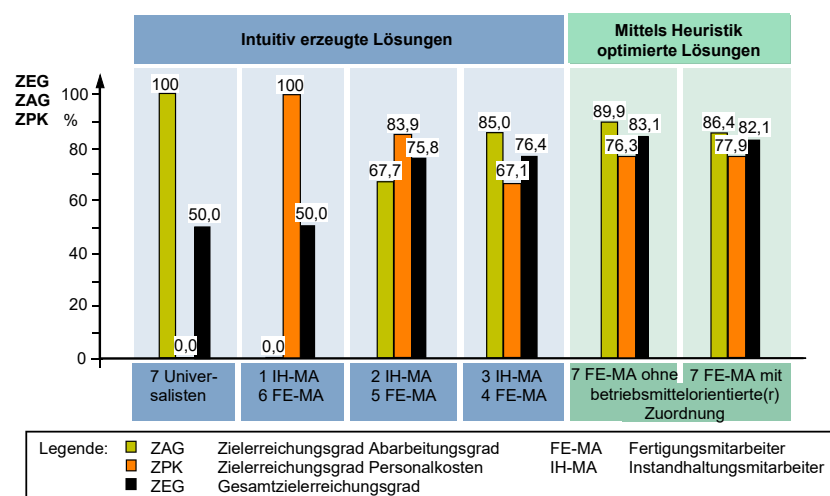


Abbildung 1: Vergleich alternativer Personalstrukturen in einer Umformfertigung (Quelle: Zülch & Vollstedt 2017, S. 11, modif.)

Aber auch erste arbeitsphysiologische und –psychologische Analysen wurden durchgeführt. Beispielsweise wurde der Einfluss einer älter werdenden Belegschaft auf die Produktionsleistung eines Montagesystems über 14 Jahre hinweg simuliert (Waldherr & Schmidt 2009). Ein Beispiel aus jüngerer Zeit ist die Untersuchung von Arbeitszeitsystemen hinsichtlich entstehender Konfliktpotenziale mit den Freizeitpräferenzen der Mitarbeiter (z.B. Leupold et al. 2019).

3. Anthropometrie und Arbeitsphysiologie in der Digitalen Fabrik

Für die mikroergonomische Analyse ist insbesondere das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept nach Rohmert (1984) von Bedeutung. Es unterscheidet bekanntlich zwischen der auf den arbeitenden Menschen einwirkenden Belastung durch die Arbeitsaufgabe und die Arbeitsumgebung einerseits und andererseits der dadurch hervorgerufenen Beanspruchung eines menschlichen Individuums. Außerdem ist zwischen einer Zeitpunkt- und einer Zeitraum-bezogenen Analyse zu unterscheiden. Schließlich geht es nicht nur darum, Belastung bzw. Beanspruchung numerisch zu bewerten, sondern beide jeweils auch hinsichtlich des Arbeits- und Gesundheitsschutzes zu beurteilen (Zülch & Keller 2021, S. 179 f.).

In der VDI-Richtlinie 4499-4 aus dem Jahre 2015 war zunächst die ergonomische Prognose aufgrund der Arbeitsaufgabe Gegenstand der Betrachtung. Aus der Sicht der Biomechanik werden Werkzeuge zur Anthropometrie und Arbeitsphysiologie in der Digitalen Fabrik erörtert. Ein Beispiel sind anthropologisch ungünstige Arbeitsvorgänge, die bei einer Zeitraum-bezogenen Belastungsprognose die Verbindung mit einem ereignisgetriebenen Simulationsverfahren erfordern (Abb. 2).

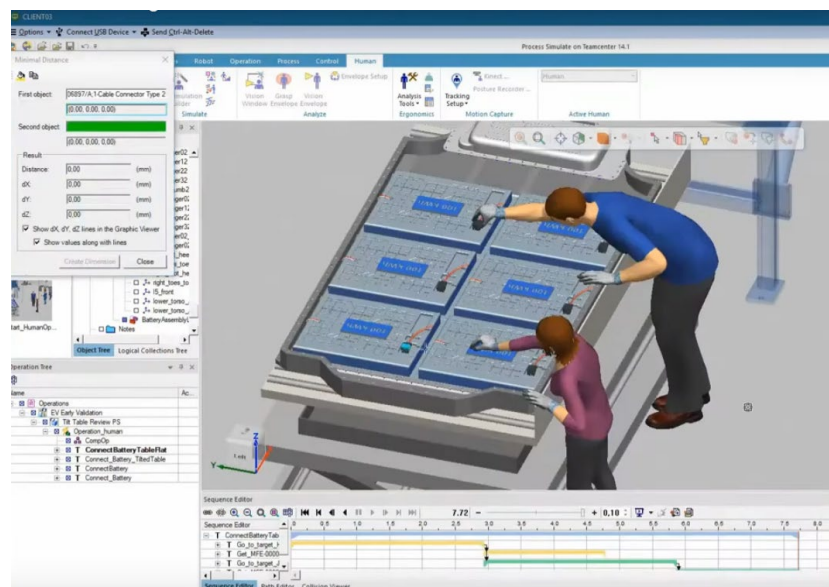


Abbildung 2: Prognose ungünstiger Körperhaltungen mittels Siemens Tecnomatix Process Simulate Human (Quelle: LTS 2020)

4. Physikalische Umgebungseinflüsse in der Digitalen Fabrik

Die jüngste Entwicklung ist die für das Jahr 2022 erwartete VDI-Richtlinie 4499-5, die sich zurzeit als sog. Gründruck in der Einspruchsphase ihrer Veröffentlichung

befindet. Das Richtlinienblatt befasst sich mit der Belastung und Beanspruchung des arbeitenden Menschen durch die Arbeitsumgebung und konzentriert sich auf die vom Richtlinienausschuss als vorrangig erkannten physikalischen Umgebungseinflüsse in einem geschlossenen Arbeitsraum. Diese Umgebungseinflüsse werden in die Aspekte Arbeitsraum, Raumluft, mechanische sowie elektromagnetische Schwingungen gegliedert. Zur jedem der behandelten Umgebungseinflüsse werden Bewertungsmethoden und in Deutschland verfügbare Softwareverfahren genannt. Außerdem werden die in Verordnungen und anderen normativen Regelungen vorliegenden Grundlagen zur Beurteilung erörtert.

Zur Belastungsprognose gibt es bereits einige in Deutschland verfügbare Softwareverfahren, die jeweils zumindest anhand eines Beispiels veranschaulicht werden. Typische Beispiele sind der Schalldruckpegel (Abb. 3) und die Beleuchtung in einem Arbeitsraum. Etwas ungewöhnlichere Werkzeuge sind die Vorhersage von Kühlschmierstoff-Aerosolen und -Dämpfen in einer Werkzeugmaschine und das elektromagnetische Feld einer Punktschweißzange. Meist handelt es sich dabei allerdings um Insellösungen, die nicht in die Digitale Fabrik integriert sind.

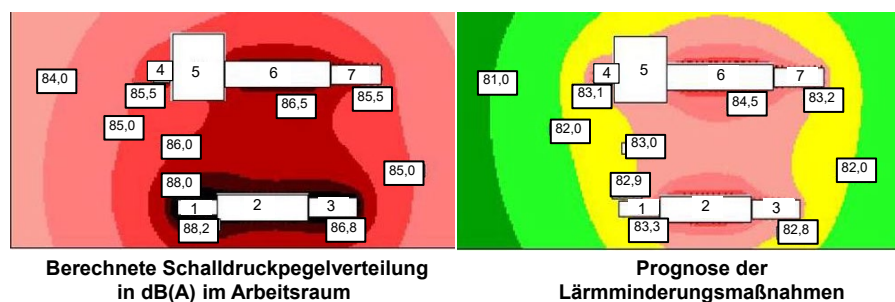


Abbildung 3: Lärminderung in einer Druckerei (nach VDI-Entwurf 4499-5, DGUV-IFA 2014)

Anwendungen zur Prognose der menschlichen Beanspruchung durch Umgebungseinflüsse sind viel weniger verfügbar. Dazu gehört beispielsweise die Beanspruchung des menschlichen Gewebes (Abb. 4) oder die Nervenreizung durch ein elektromagnetisches Feld. Von weit größerer Bedeutung sind die thermophysiological und die radioaktive Beanspruchung menschlicher Organe. Es ist jedoch zu beachten, dass letztere heute zur Vorbereitung einer medizinischen Behandlung verwendet wird, obwohl diese Verfahren ursprünglich für den Arbeits- und Gesundheitsschutz entwickelt wurden (Fill et al. 2004). Wie oben erwähnt, sollte zusätzlich zur Bewertung des Niveaus einer Beanspruchung falls möglich auch deren Beurteilung anhand normativer Regelungen erfolgen.

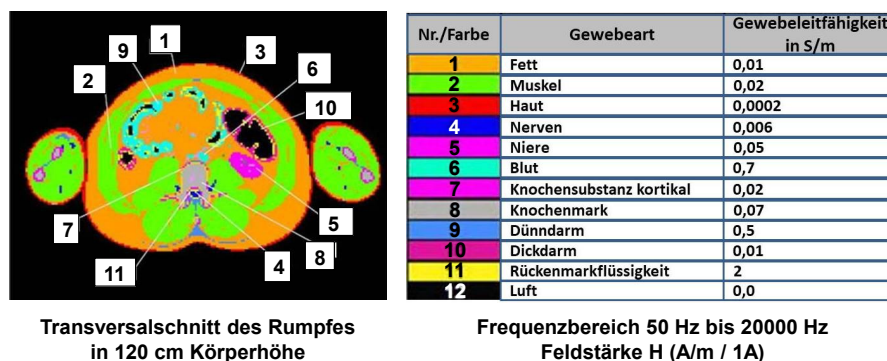


Abbildung 4: Beanspruchung des menschlichen Gewebes durch elektromagnetische Felder (nach VDI-Entwurf 4499-5, DGUV-IFA 2015)

5. Weiterführende Entwicklungsarbeiten

Die drei Richtlinienblätter weisen eine Reihe von Lücken auf. So fehlen bislang bei der makroergonomischen Simulation weitestgehend arbeitssoziologische Aspekte sowie die produktionslogistische Bewertung der Zusammensetzung von Arbeitsgruppen nach Alter und Geschlecht. Auch motivationale Aspekte fehlen weitestgehend. Diese Lücken sind vorrangig bedingt durch fehlende Berechnungsmethoden. Die mikroergonomischen Softwareverfahren der Digitalen Fabrik zeigen bereits einen guten Stand bezüglich der Belastung durch die Arbeitsaufgabe auf. Auch gibt es aus den normativen Regelungen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes viele Grenzwerte, die zur Beurteilung herangezogen werden können. Hingegen gibt es nur wenige Beispiele zur Beanspruchungsprognose.

Am wenigsten entwickelt ist derzeit die Einbeziehung von Umgebungseinflüssen in die Digitale Fabrik. Dabei überwiegt die Bewertung von Belastungsaspekten, während die Beanspruchung des arbeitenden Menschen noch wichtiger Ergänzungen bedarf. Es fehlen Aspekte wie Arbeiten im Unter- und Überdruck, künstliche optische Strahlen (außer Beleuchtung) und radioaktive Korpuskularstrahlen. Chemische und biologische Faktoren, die beim (taktilen oder ingestiven) Kontakt mit Arbeitsgegenständen und Materialien auftreten können, werden ebenfalls nicht behandelt. Insofern beschränken sich die Richtlinienblätter auf die Ausbreitung in geschlossenen Arbeitsräumen durch physikalische Einwirkungen, vor allem in Folge von Luftströmungen.



Abbildung 4: Vision der Prognose von Arbeitsbelastungen in der Digitalen Fabrik (Layout-Graphik: Spitzhörn, imk automotive 2020)

6. Vision der ergonomischen Bewertung in der Digitalen Fabrik

Aus dem Vorgenannten ergibt sich eine Reihe von Aufgaben für die Ergonomie. Dazu gehört die Zeitraum-bezogene Bewertung und Beurteilung sukzessiver und simultaner Belastungen, und dies erst recht für kombinierte Belastungsarten. Zwar gibt es hierfür vereinzelt Berechnungsmethoden, aber ein genereller Ansatz ist nicht verfügbar. Auch für die notwendige Kopplung von Simulation und Digitaler Fabrik bei

Zeitraum-bezogenen Analysen gibt es nur wenige Realisierungen. Darüber hinaus sind immer wieder Fragen an die Validität der Berechnungsverfahren zu stellen (siehe z.B. Zülch & Keller 2021, S. 180 ff.). Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass es noch vielfacher Anstrengungen in Forschung und Entwicklung bedarf, um die Vision einer umfassenden ergonomischen Prognose virtuelle Realität werden zu lassen (Abb. 5).

7. Literatur

- Briceno L, Paul G (2018) MakeHuman: A Review of the Modelling Framework. In: Bagnara S, Tartaglia R, Albolino S, Alexander T, Fujita Y (Eds) IEA 2018: Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association, AISC Volume 822:224–232. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96077-7_23.
- Fill, UA, Zankl M, Petoussi-Henss N, Siebert M, Regulla D (2004) Adult female voxel models of different stature and photon conversion coefficients for radiation protection. *Health Physics*, 86(3):253–272.
- Illmann B, Fritzsche L, Ullmann S, Leidholdt W (2015) Ganzheitliche Gefährdungsbeurteilung mit digitalen Menschmodellen – Die Integration von Umgebungsbedingungen in die Digitale Fabrik. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Ed) VerANTWORTung für die Arbeit der Zukunft. Dortmund: GfA Press. <http://gfa2015.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de/inhalt/A.2.7.pdf>.
- Neumann WP, Winkelhaus S, Grosse EH, Glock CH (2021) Industry 4.0 and the human factor - A systems framework and analysis methodology for successful development. *International Journal of Production Economics* 233:107992. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107992>.
- Nunes IL (Ed) (2019) AHFE: International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, AISC Volume 781. Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94334-3>.
- Leupold M, van Hall M, Höfer K, Zülch G (2019) Simulation Analysis of Alternative Personnel Structures in the Shipping Division of a Tinplate Manufacturer. *Procedia Manufacturing*, 39:583-590.
- LTS - Longterm Technology Service (2020) Tecnomatix Process Simulate Human - Force Solver Demo. London, ON: LTS. <https://www.youtube.com/watch?v=dIUg2lp-t-M>.
- Rohmert W (1984) Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 38(4):193-200.
- Spitzhirm M (2020) Persönliche Mitteilung, 13.02.2020. Chemnitz: imk automotive.
- VDI 3633-6:2001-10 (2001) Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Abbildung des Personals in Simulationsmodellen. Berlin: Beuth. <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-3633-blatt-6/44890290>.
- VDI 4499-4:2015-03 (2015) Digitale Fabrik - Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik. Berlin: Beuth. <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-4499-blatt-4/222813009>.
- VDI 4499-5:2021-12 (2021) Entwurf Digitale Fabrik - Prognose von Umgebungseinflüssen auf den arbeitenden Menschen. Berlin: Beuth. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4499-blatt-5-digitale-fabrik-prognose-von-umgebungseinflussen-auf-den-arbeitenden-menschen>.
- Waldherr M, Schmidt D (2009) Altersdifferenzierte Neuplanung von Montagesystemen. In: Zülch G, Stock P (Eds) Auswirkungen der demographischen Entwicklung in Montagesystemen. Karlsruhe: Universität, Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation, 103-119.
- Zülch G, Keller V (2021) Die neue VDI-Richtlinie zur Prognose von Umgebungseinflüssen in der Digitalen Fabrik. In: Franke J, Schuderer P (Eds) Simulation in Produktion und Logistik 2021 (ASIM-Mitteilung Nr. 177). Göttingen: Cuvillier, 1-10.

Danksagung: Besonderer Dank gilt den Mitgliedern des VDI-Richtlinienausschusses 4499-5, die sich über viele Jahre hinweg in zahlreichen persönlichen und virtuellen Sitzungen mit der hier dargestellten Problemstellung befasst und wertvolle Beiträge zum Gelingen dieses Richtlinienblattes geleistet haben.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Technologie und Bildung in hybriden Arbeitswelten

68. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und
Fabrikautomatisierung IFF, Magdeburg

02. – 04. März 2022

GfA-Press

Bericht zum 68. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 02. – 04. März 2022

**Otto-von Guericke-Universität Magdeburg;
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Sankt Augustin: GfA-Press, 2022
ISBN 978-3-936804-31-7

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

© 2022 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de