

Evaluation von Antriebssystemen für Exoskelette

Johannes WANNER, Matthias HAAG

*Robotiklabor, Hochschule Aalen
Beethovenstraße 1, D-73430 Aalen*

Kurzfassung: Für körperlich anstrengende Arbeiten werden in Industrie und Handwerk passive, aber verstärkt auch aktive Unterstützungen der menschlichen Skelettstruktur eingesetzt. Diese sogenannten aktiven Exoskelette sind gegliedert in die Antriebstechnik bestehend aus Aktorik und Sensorik, sowie der künstlichen Skelettgeometrie aus dem Bereich der Orthetik. Explizit für die oberen Extremitäten sind diese noch nicht üblich, langfristig aber nötig. Im Rahmen eines BMBF geförderten Projektes entwickelt die Hochschule Aalen modulare Aktoren, welche der Orthopädiertechnik zur Gestaltung aktiver Systeme zur Verfügung gestellt werden. Insbesondere wird eine standardisierte Methodik zur Evaluation von Antriebssystemen beim Einsatz von Exoskelette entwickelt.

Schlüsselwörter: Exoskelette, Antriebssysteme, Evaluation von Exoskeletten, Evaluation von Antriebssystemen, Nutzerempfinden von Antrieben

1. Einleitung

Aktive Systeme verfügen über Sensorik und Regelungseinheiten, welche entsprechende Signale an die Aktoren des Exoskeletts übermitteln. Die Erforschung der Mechanik, Steuerung, Regelung und Sensorik erfolgt im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes LEVIAKTOR (Förderkennzeichen: 16SV8005), gemeinsam mit anderen Projektpartnern. Innerhalb dieses Projekts wird eine standardisierte Methodik zur Evaluation von Antriebssystemen für den Einsatz in Exoskelette entwickelt. Ein Exkurs in die Automobilindustrie zeigt, wenn ein neuer PKW entwickelt wird, muss dieser durch einen benannten technischen Dienst beispielsweise TÜV akkreditiert werden. In Folge dessen kann eine Typengenehmigung erteilt werden. Hierdurch ist gewährleistet, dass die angestrebten technischen Eigenschaften erfüllt und die Nutzer des Fahrzeugs keinen sicherheitstechnischen Mängeln ausgesetzt sind. Zudem ist eine generelle Tauglichkeit des kompletten Fahrzeugs sichergestellt. Oft werden bewährte Teilkomponenten von anderen Modellen ohne erneute Akkreditierung verbaut. Beispielsweise werden Motoren nicht neu entwickelt, sondern nahezu beliebig in verschiedene Karosserien integriert. Dies ist möglich, weil die Antriebe nach gesetzlichen Vorgaben und dem Wissen um das Erreichen einer hohen Kundenzufriedenheit ausgelegt sind. Eine Prüfung der Eigenschaften findet zuvor außerhalb des Fahrzeugs durch Simulationen und auf Prüfständen statt. Eine erneute Leistungsmessung beispielsweise ist nicht mehr nötig. Diese Strategie soll zur gefähderungsfreien und wirtschaftlichen Entwicklung von aktiven Exoskelette im Bereich der Antriebssysteme genutzt werden.

2. Problemstellung

Antriebe für Exoskelette sind maschinenbautechnische Elemente, die über einer Orthese ähnliche Struktur fest mit dem Menschen verbunden sind. Durch diese nicht umgehend trennbare Verbindung gilt es bestimmte sicherheitsrelevante Anforderungen einzuhalten. Prüfkriterien oder Empfehlungen für Exoskelette, wie es bei Kfz-Neuzulassungen nötig ist, gibt es nicht. Empfehlungen und Anlehnungen an Normen wie die DIN EN ISO 13482:2014-11 existieren zwar, jedoch meist nur auf das gesamte Exoskelett bezogen (DGUV Ausgabe 02/2018). Des Weiteren sind für den Nutzer relevante Eigenschaften der Antriebe an sich, wie Stören der Geometrie, optisches Ansprechen, Masse, Geräusche und Vibrationen nur teilweise durch Normen begrenzt. Hinsichtlich der Akzeptanz stehen dem Entwickler bisher keine Hinweise zur Verfügung. Eine zielführende Entwicklung neuer aktiver Exoskelette beginnt somit oft bei null. Die Kosten steigen und die Verbreitung auf dem Markt und somit auch die Unterstützung der Werker ist gering. In der Praxis lässt sich die Entwicklung hauptsächlich in die Bereiche der Orthopädietechnik und der Antriebstechnik teilen.

Generell sind bei der Erforschung, durch die feste Verbindung von Mensch und Maschine, die Antriebssysteme wiederum in zwei Bereiche zu unterteilen. Zum einen in die Untersuchung der objektiven maschinenbautechnischen Eigenschaften wie Wärme nach DIN EN ISO 13732-1, Leistung, Vibration nach DIN EN ISO 5349 bei denen auch die Einhaltung entsprechender Normen überprüft wird. Andererseits das subjektive Empfinden des Werkers beispielsweise von Geometrie, Vibration, Lautstärke nach DIN EN ISO 9612 und Unterstützungsgrad, welche maßgeblich die Akzeptanz (Davis 1985) beeinflussen. Beide Prüfverfahren müssen auf alle Antriebe übertragbar sein. Somit soll es möglich sein zukunftsorientiert verschiedene auf dem Markt befindliche oder neue entwickelte Antriebe miteinander zu vergleichen und ihre Einsatzmöglichkeiten systematisch zu erfassen. Aktuell gibt es hier noch keine einheitlich verwendbare Verfahren, wodurch Ergebnisse nur bedingt vergleichbar sind.

3. Zielsetzung

Eine systematische Evaluierung ist für eine wirtschaftliche Entwicklung von aktiven Exoskelette erforderlich. Zwar wird das Gesamtsystem selbst immer überprüft, werden jedoch bereits erforschte Elemente verbaut ist der Aufwand zur Integration gering.

Ziel ist es die Antriebssysteme hinsichtlich Nutzen und Störempfinden zu evaluieren. Hier gilt es maßgebliche Eigenschaften zu definieren und entsprechende allgemeingültige Methoden zu deren statistisch signifikanten Bewertung zu entwickeln. Durch das Wissen, um die Tauglichkeit und Eigenschaften von Antriebssysteme, ist die Grundlage für die Hersteller geschaffen, diese in Exoskelette für unterschiedliche Anwendungen und Gelenke zu integrieren. Ergänzend dienen die Prüfverfahren und Kriterien den Entwicklern der Antriebssysteme als Orientierung, um taugliche Systeme, welche Nutzerakzeptanz und Sicherheit priorisieren gezielt zu realisieren.

4. Methodik

Zu Beginn wurde im Expertenteam bestehend aus Orthopädietechniker, Arbeitswissenschaftler, Biomechatroniker und Antriebstechniker Kriterien erarbeitet und unter Verwendung des Paarvergleichs priorisiert. Unter anderem wurde zur Abschätzung

der Gelenkgeschwindigkeiten und Beschleunigung, Versuche mit Probanden im Projektkonsortium durchgeführt, um so realitätsnahe Anforderungen zu definieren. Zusätzlich sind Normen zu Sicherheitsanforderungen für persönliche Assistenzroboter und kollaborierende Roboter hinsichtlich Sicherheit und der später angestrebten Serienreife berücksichtigt. Durch die Methodik des Paarvergleichs konnten diese priorisiert und mehrstufige sogenannte Quality Gates unter Einteilung in ABC-Klassen erarbeitet werden. Damit schon frühzeitig eine Beurteilung der Systeme auf ihre prinzipielle Tauglichkeit stattfinden kann, wird in zwei Stufen evaluiert. Durch die Punktzahlen der Anforderungen, welche im Paarvergleich ermittelt wurden, ergibt sich die A-Klasse. Das 1. Gate beinhaltet diese Anforderungen und wird objektiv bewertet. Sind alle Anforderungen erfüllt soll mit dem 2. Gate begonnen werden. Eine Aufteilung der Anforderungen in messbare und bewertbare Kriterien ist erforderlich. Des Weiteren müssen diese genau spezifiziert bzw. in geeignete Prüfkriterien / Hypothesen umgewandelt werden. Zuvor unkonkrete Anforderungen wie geringe Wärmeentwicklung, müssen durch Richtwerte oder akzeptierbarer Grenzwerte deklariert und zulässige Messverfahren entsprechend gewählt werden. Verschiedene Teillösungen sind unter Zuhilfenahme entsprechender Literatur und/oder der Durchführung von Vorversuchen zu ermitteln. Taugliche Lösungsansätze und Prüfabläufe sind iterativ aus zu arbeiten und zu erproben. Die mit Hilfe kalibrierter Gewichte und Messgeräte erfassten Daten werden mit den Anforderungen verglichen und die technische Tauglichkeit bewertet. Hierzu sind Bewertungstabellen erforderlich, die für verschiedene Systeme, abhängig von Grenzwerten, entsprechend skalierbar sind. Über dies hinaus sind Probandenversuche zur Erfassung des Empfindens hinsichtlich der Geometrie, Bewegungsfreiheit, sowie der Unterstützung durch den Antrieb durchzuführen. Dazu sind Bewegungsfolgen und zu erreichende Punkte innerhalb des Arbeitsraums zu definieren, sowie Bewertungshilfen den Probanden zur Verfügung zu stellen. Validität und Variablen sind festzulegen und Störvariablen durch den Versuchsaufbau/Ablauf möglichst zu eliminieren. Eine hohe Reliabilität zur Tauglichkeit des Versuchs ist zu beurteilen. Durch geeignete Maßnahmen wie einheitliche schriftliche Fragestellungen und Informationen für die Probanden, sowie eine zuvor klar festgelegte Bewertungsstrategie der Ergebnisse trägt zur hohen Objektivität bei.

5. Status quo

Um die Fragen hinsichtlich dem Empfinden von Masse, Geometrie, Unterstützung, Lautstärke, Vibration und Widerstand durch Probandenversuche zu bewerten, wurde ein entsprechender Versuchsablauf entwickelt. Hierzu wurden anhand des Greifraums (Fischer & Kaufmann & Kirchner & Schmid et al. 2015) Punkte im Aufbau markiert. Durch entsprechende Bewegungen wird ein deutliches Bewusstsein für eine zusätzliche am Körper befindliche Geometrie und Masse erlangt. Ergänzend wurden Bewegungsabläufe, wie Trinken oder Regaleinräumen definiert. Dem Proband / der Probandin wurde zuerst eine Orthese ohne Antriebssystem angelegt und die Messabläufe im Sitzen und Stehen durchgeführt. Hierzu wird eine Ellenbogenorthese Donjoy X-Act ROM für den rechten Arm, welche als Träger für die zu erprobenden Antriebseinheiten gilt, an die Probanden angepasst. Hierzu muss die körpereigene Bewegungsachse mit dem Freiheitsgrad des externen Gelenks möglichst exakt fluchten. Beschleunigungen wurden aufgezeichnet und Bewertungen durch Befragungen der Probanden ermittelt. Um eine realitätsnahe Arbeitsgeschwindigkeit zu erzeugen, werden die Bewegungen mit einem 2 kg Gewicht ausgeführt. Anschließend wurden die selben Abläufe mit den

Antriebssystemen wiederholt. Über die Differenz zwischen Orthese ohne Antriebssystem und Orthese mit Antriebssystem lassen sich die Werte des Antriebssystems unabhängig von Orthese ermitteln. Die zur Verfügung gestellten Bewertungshilfen ermöglichen die Empfindung in Punkte von 0 - 4, wobei 0 allgemein völlig untauglich und 4 als ideal beschrieben ist, zu quantifizieren. Zu diesem Zeitpunkt war die Sicherheit der Antriebe nicht hinreichend gegeben. Da der Versuch somit ohne permanente aktive Unterstützung stattfindet, werden antriebstechnische Aspekte im geringen Maße auf einem separaten Prüfstand erfasst. Hier konnte der Proband mittels Taster eine geringe Unterstützung aktivieren. Die Verwendung des Tasters ist notwendig, da die Antriebssysteme zwar mit Regelung überprüft werden sollen, aber wie das Startsignal für die Bewegung des Antriebs erzeugt wird, bspw. durch Drucksensoren oder myoelektrisch, ist in Abhängigkeit des späteren Einsatzgebietes zu wählen und daher hier nicht relevant. Vorerst wurden 9 Probanden und 1 Probandin untersucht. Diese wurden so ausgewählt, dass sie möglichst einheitlich hinsichtlich Größe, Gewicht, Alter, Interessengebiet und Erfahrungen mit Exoskelette etc. aufweisen. Untersucht wurden eigenentwickelte Antriebssysteme (J. Wanner & M. Haag 2020) davon die zwei Varianten (Abbildung 1), die mutmaßlich das höchste Störpotenzial aufweisen.

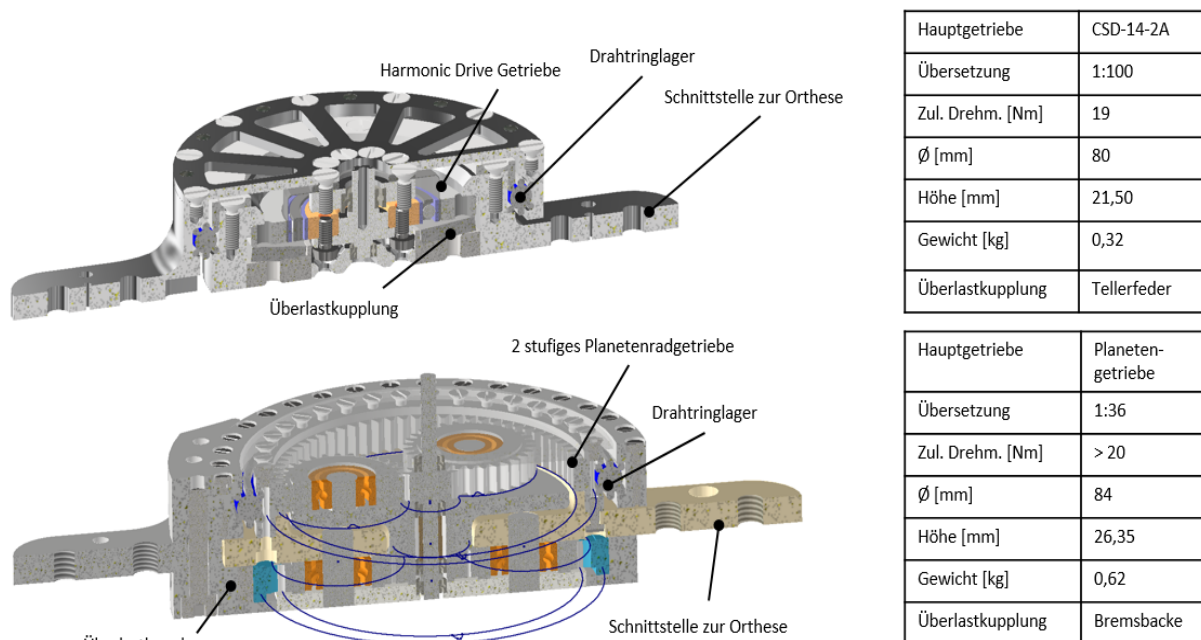


Abbildung 1: Oben CSDTQ38, unten PGTQ38, beide mit TQ-Motor ILM38x06.

Mittelwerte und Standardabweichungen sind zu berechnen und der Vertrauensbereich (Kuchling 2011) zu bestimmen. Die Anzahl der Probanden ist für eine statistisch signifikante Belastbarkeit so zu wählen, dass der Vertrauensbereich $\pm 0,5$ Punkte beträgt. Die aus den Versuchen ermittelten Ergebnisse sind aus Tabelle 1 zu entnehmen. Die in Frage 2 – 5 beschriebenen Werte geben die negative Veränderung des Discomforts vom Versuch „nur Orthese“ zu „Orthese plus Antriebssystem“ wieder. Somit würde 0 keine spürbare Veränderung bedeuten und je geringer der Wert, desto größer der Discomfort im Vergleich zu „nur Orthese“.

Tabelle 1: Erste Ergebnisse der Versuche mit Probanden.

bei 10 Probanden/in	Vertrauensbereich:			
	Antriebssystem		Vertrauensbereich:	
	CSDTQ38		PGTQ38	
1. Erster Eindruck des Exoskeletts	3,25	2,55	3,25	2,55
2. Geometrie der Antriebseinheit in Bezug auf die Erreichbarkeit der Pos.	-0,65	-2,95	-0,21	-3,69
3. Löst das Antriebssystem bei den Bewegungen Unbehagen aus?	-0,32	-2,38	-0,23	-2,47
4. Masse des Antriebssystems beim Bewegen des Arms	0,36	-3,16	-0,20	-2,80
5. Widerstand des Antriebssystems beim Beugen und Strecken	-3,24	-6,76	-0,29	-3,71
6. Wie wird die Unterstützung des Antriebssystems empfunden?	2,94	2,06	3,44	2,16
7. Wie wird die Lautstärke während der Unterstützung empfunden?	2,92	2,28	3,59	2,81
8. Wie wird die Vibration während der Unterstützung empfunden?	3,92	3,28	3,83	3,17

6. Diskussion

Im Versuch sollen die Einflüsse von Geometrie, Maße, Schwerpunkt, sowie der Empfundene Widerstand beim Beugen und Strecken von verschiedenen Antriebseinheiten, im Hinblick auf Haptik und Tragekomfort bewertet werden. Die abhängige Variable wird allgemein als Störempfinden deklariert. Die Unabhängige wie Masse, Geometrie, etc. sind durch die Antriebssysteme gegeben. Das Verrutschen der Orthese während des Versuchs, wurde durch visuelle Überprüfung der Achse von Ellenbogen und Gelenk, nach jeder Bewegungsfolge überprüft. Die Geschwindigkeit der Bewegungen, sowie die Beschleunigung wird durch das Mitführen des Gewichts eingegrenzt. Ergänzend wurden die Werte mittels Beschleunigungssensor überwacht. Die Bewegungen selbst sind durch Markierungen und der entsprechenden Reihenfolge standardisiert. Diese sind so gewählt, dass innerhalb der Greifräume möglichst große Winkeländerungen von Schulter und Ellenbogen nötig sind. Dies ist zudem angelehnt an den im Projektkonsortium durchgeführten Versuch. Einflüsse durch gesundheitliche Beeinträchtigungen oder Vorkenntnisse wurden durch Befragung ausgeschlossen. Das Alter der studentischen Probanden liegt zwischen 18 - 30 Jahre, wodurch körperliche Beeinträchtigungen generell eine geringe Wahrscheinlichkeit aufweisen. Möglichst gleiche Probanden wurden durch Einhalten des 5 bis 95 Perzentils bei Größe und Gewicht nach DIN 33402 und gleichem Interessensgebiet hinsichtlich Robotik und Technik ausgewählt. Das Tragen einer Orthese wird generell als störend empfunden, insbesondere dann, wenn keine oder nur wenig Unterstützung stattfindet, wodurch kein Nutzen entsteht. Durch die Berechnung der Differenz zwischen Versuch, nur mit Orthese und Versuch mit Orthese und Antriebseinheit, kann das tatsächliche Störempfinden des Probanden der alleinigen Antriebseinheit zugeordnet werden. Die Geschwindigkeit (30 U/min) und das Drehmoment (5 Nm) sind entsprechend der angestrebten maximal Werte zu wählen. Dies wurde durch die manuell zuschaltbare Unterstützung durch das Antriebssystem programmtechnisch, unter Berücksichtigung der Übersetzung, eingehalten. Die Trägheit der Systeme ist noch nicht bekannt und wurde nicht berücksichtigt. Der Winkelbereich wurde durch mechanische Anschläge begrenzt. Die wechselnde Reihenfolge in der die Antriebssysteme montiert und untersucht werden, wirkt unbewusste systematische Vergleiche innerhalb der Antriebssysteme entgegen.

Die Methodik erweist sich als praktikabel und gilt nun in weiteren Schritten bestätigt zu werden. Hierzu sollen weitere Probandengruppen untersucht werden, sowie die

technischen Eigenschaften, nach dem Referenzieren des Antriebsstandes, systematisch erfasst werden. Die Ergebnisse, explizit der Probandenstudien, werden unter anderem im Projektkonsortium Leviaktor diskutiert, um die Methodik iterativ weiterzuentwickeln.

Die Bedeutung einer Systematik, zur allgemeingültigen Evaluierung der Antriebssysteme, ist maßgeblich für eine strategische Weiterentwicklung von Exoskelette und deren Einsatzbereiche. Erst hierdurch ist eine quantitative Anwendung und somit auch eine qualitative Prävention der Gesundheit von Werkern zu erzielen.

7. Literatur

- ArbSchG (06.03.2007) „Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung - LärmVibrationsArbSchV“
- Davis F (1985) A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems - theory and results, PhD thesis, Massachusetts Inst. of Technology.
- DIN 33402-2 (2005) Ergonomie Körpermaße des Menschen Teil 2: Werte. ICS 13.180
- DIN EN ISO 13732-1 (2008-12) Ergonomie der thermischen Umgebung - Bewertungsverfahren für menschliche Reaktionen bei Kontakt mit Oberflächen - Teil 1: Heiße Oberflächen.
- DIN EN ISO 9612 (09.2009) Akustik - Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz - Verfahren der Genauigkeitsklasse 2.
- DIN EN ISO 13482 (2014) „Roboter und Robotikgeräte – Sicherheitsanforderungen für persönlicher Assistenzroboter“
- DIN EN ISO 5349-2 (12.2015) Mechanische Schwingungen - Messung und Bewertung der Einwirkung von Schwingungen auf das Hand-Arm-System des Menschen - Teil 2: Praxisgerechte Anleitung zur Messung am Arbeitsplatz.
- Fachbereich Handel und Logistik der DGUV (2018) Einsatz von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen. Zeitschrift DGUV 02/2018, FBHL 006.
- Kuchling H (2011) Taschenbuch der Physik. Carl Hanser Verlag ISBN 978-3-446-42457-9
- Müller J (2010) Mehr als Ease of Use – Dimensionen des Erlebens von Websites. Usabilityblog
- Schmid D, Fischer G, Kaufmann H, Kirchner A (2015) Qualitätsmanagement. Europa-Lehrmittel-Nr.: 53812.
- Wanner J, Haag M (2020) Entwicklung eines modularen Antriebssystems zur universellen Einbindung in Exoskelette. GfA, Dortmund (Hrsg.): Frühjahrskongress 2020, Berlin, Beitrag D.1.17.

Danksagung: Unser Dank gilt dem Projektträger, dem Bundesministerium für Bildung und Forschung. Ein ganz besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Martin Schmauder von der TU Dresden. Des Weiteren möchten wir uns beim Konsortium LEVIAKTOR für die kompetente Zusammenarbeit bedanken.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Arbeit HUMAINE gestalten

67. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Lehrstuhl Wirtschaftspsychologie (WiPs)
Ruhr-Universität Bochum

Institut für Arbeitswissenschaft (IAW)
Ruhr-Universität Bochum

3. - 5. März 2021

GfA-Press

Bericht zum 67. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 3. - 5. März 2021

**Lehrstuhl Wirtschaftspsychologie, Ruhr-Universität Bochum
Institut für Arbeitswissenschaft, Ruhr-Universität Bochum**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2021
ISBN 978-3-936804-29-4

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**

Schriftleitung: Matthias Jäger

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.

Screen design und Umsetzung

© 2021 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de