

Crowd-based Assessment of Communication Limitations in Dysarthria – Development and Evaluation of the KommPaS Web App

Kumulative Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Philosophie
der Ludwig-Maximilians-Universität
München

vorgelegt von

Katharina Maria Lehner

aus

Landau a.d. Isar

2021

Referent: Prof. Dr. Wolfram Ziegler

Korreferent: Dr. phil. habil. Christoph Draxler

Tag der mündlichen Prüfung: 15. November 2021

Contents

Structure of the thesis	1
Part A	2
1 Introduction	3
1.1 Motivation and core idea	3
1.2 Project goals	9
1.3 Outline of the publications	9
1.4 Overview of the data collection process	15
1.5 References	20
Part B	26
2 Paper 1: Web-based assessment of communication-related parameters in dysarthria: Development and implementation of the KommPaS Web App	27
3 Paper 2: The impact of lexical and articulatory factors in the automatic selection of test materials for a web-based assessment of intelligibility in dysarthria	28
4 Paper 3: Crowdsourcing as a tool in the clinical assessment of intelligibility in dysarthria: How to deal with excessive variation	29
5 Paper 4: Clinical measures of communication limitations in dysarthria assessed through crowdsourcing: Specificity, sensitivity, and retest-reliability	30
6 Paper 5: Indicators of communication limitation in dysarthria and their relation to auditory-perceptual speech symptoms: Construct validity of the KommPaS Web App	31

Part C	32
7 Conclusion	33
7.1 Summary of the main findings	33
7.2 Contributions to research, clinical practice, and education	35
7.3 Overall discussion and future work	38
7.4 Bottom line	41
7.5 References	42
Appendix	43
Zusammenfassung [German summary]	59
Acknowledgments	67

Structure of the thesis

The dissertation consists of three parts. **Part A** starts with the problem statement and the motivation arising from it, which then leads to the presentation of the core idea and the project's goals. It further introduces Part B by outlining the publications on the development and evaluation of the KommPaS web application and giving an overview of the data collection process.

Part B is composed of five papers on the KommPaS approach as the common theme, which have already been published in peer-reviewed journals. Each of them forms a separate chapter (Chapters 2 to 6) and can be read independently. References to the individual publications are cited in the corresponding chapters.

Part C concludes the thesis. First, the main findings of the papers embedded in this thesis are recapitulated. Afterwards, the contributions of this work to research, clinical practice, and education are pointed out, followed by the elaboration of some general points of debate of this thesis. Subsequently, Part C indicates several anchor points for future work.

Part A

1 Introduction

1.1 Motivation and core idea

[...] *the evaluation of a speech disorder always begins with a perceptual judgment that speech has changed or is abnormal in some way.* (Duffy, 2020, p. 6)

This thesis focuses on dysarthria in adults – a speech disorder that can occur in various neurological diseases, which inhibit neuromuscular control and execution of movements required for speaking (e.g., Parkinson’s disease, cerebral palsy, stroke, and traumatic brain injury). Dysarthria represents the most common communication disorder having a neurologic origin (Ackermann, 2018; Duffy, 2020).

Two types of experts in the assessment of speech in dysarthria

Difficulty moving the laryngeal, articulatory, velopharyngeal, and respiratory muscles leads to perceptually salient “changes” and “abnormalities” in the speech signal. These auditory-perceptual features of speech can be judged quite differently depending on the listener’s perspective.

Regarding evaluators of speech disorders, one intuitively thinks of *speech and language therapists* (SLTs), who are educated and experienced in assessing and treating persons with dysarthria (PWD). Speech and language therapists are trained to do a fine-grained auditory analysis of the symptom pattern with the aim to discover the underlying dysfunctions in speech motor subsystems. For instance, the Mayo Clinic rating system (Duffy, 2020, p. 85f), which has had the greatest international impact on the classification of dysarthrias, comprises more than 40 deviant speech characteristics encountered in motor speech disorders, such as a strained or harsh voice, forced inspiration, imprecise articulation, and hypernasality. This rating system illustrates how sophisticated the auditory description of the speech signal can be. In the German-speaking world, SLTs are well-equipped with feasible instruments in this diagnostic area, including the psychometrically validated and standard-normalized Bogenhausen Dysarthria Scales (BoDyS; Ziegler et al., 2018; Ziegler

et al., 2017). The SLTs' expertise regarding *functional impairment* is indispensable in the clinical care of dysarthria since it guides tailored interventions that target the suspected underlying dysfunction.

Outside the therapy room, persons with dysarthria are implicitly and constantly evaluated by everyone they communicate with since dysarthria always deviates from an expected speech norm. From a layperson's point of view, the symptoms of the motor speech disorder do not become evident in such a differentiated way as they do for a trained ear. Instead, for laypersons the symptoms are evident in their interplay with one another and by the adverse effects they have on successful communicative interactions.

This is especially true for *naïve listeners*¹, who are not acquainted with the speaker to be assessed and have no or only incidental prior exposure to dysarthric speech in general (c.f., Carmichael & Green, 2004). Their perception reflects the negative, cumulative effects that the individual's motor speech symptoms have on communication skills in the most unbiased manner. Naïve listeners are the “real-world experts” regarding the *communication limitations* a person with dysarthria faces in everyday life.

Naïve listeners perceive dysarthria an unnatural, irritating, or even bizarre manner of speaking. The utterances of a PWD are difficult to understand or maybe even unintelligible. Furthermore, although the interlocutors might be able gain a sense of the message a PWD wants to convey, it can be challenging and strenuous for them to concentrate on decoding the patient's utterances and to endure slow and dysfluent speaking. This can cause the interlocutor to become frustrated or impatient and result in a tendency to avoid conversations with dysarthric patients altogether. Consequently, persons with dysarthria are at risk for being labeled with negative personal characteristics or mental and physical capabilities (Connaghan et al., 2020; Schölderle et al., 2019). Therefore, persons with dysarthria are not only limited in their communicative activity but also confronted with significant psychosocial burdens (Atkinson-Clement et al., 2019; Dykstra et al., 2007).

The auditory-perceptual effects that dysarthric speech has on naïve listeners provide invaluable information for the clinical care of PWD regarding the following two issues: First, it needs to be examined whether and to what extent the speech symptoms detected by an SLT's trained ear have an impact on communication abilities since the recognition and

¹ As a note on terminology used throughout this thesis, *laypersons*, *laypeople*, and *lay listeners* also refer to *naïve listeners*.

assessment of these symptoms alone does not allow a straightforward prediction of their communicative relevance (e.g., Schölderle et al., 2016). Second, the judgment of naïve listeners serves as a confirmation that functionally motivated therapeutic adjustments achieve improvements that are evident in everyday communication.

The information on dysarthric speech gained from these two types of experts (i.e., the auditory analysis of the SLT and the perception of naïve listeners) is complementary. It constitutes a comprehensive picture of the speech disorder.

The layperson's perspective on dysarthric speech – An indispensable but unattainable information in clinical assessment?

Indeed, capturing the laypersons' perspective on communication-related concepts is non-substitutable – neither by the auditory analysis by SLTs nor by computer-based speech assessments.

Ironically, due to their expertise, SLTs play a subordinate, if not impeding, role in assessing a patient's intelligibility limitations and evaluating the confusion that their way of speaking may cause in non-professional interlocutors. Speech and language therapists are biased in two respects: First, they are well acquainted with the characteristics of dysarthric speech in general (Borrie et al., 2017; Dagenais et al., 1999; Liss et al., 2002; Smith et al., 2019), which limits the representativeness of their judgments. Second, because of their familiarity with the individual PWD being assessed, they are particularly familiar with the dysarthric person's speech and become increasingly adjusted over time (DePaul & Kent, 2000; Kim & Nanney, 2014).

This familiarity bias in human listeners such as SLTs have led to an increased interest in developing automated methods for assessing communication-related concepts. Fortunately, a considerable amount of research is being undertaken to develop machine learning methods beneficial for dysarthric speech. However, from a clinical point of view, this research is still in its infancy regarding its usefulness for diagnostic purposes. For instance, in a recent study by Bhat and Strik (2020), machine learning algorithms were trained to classify dysarthric speech as either intelligible or non-intelligible. However, this binary classification does not add value to clinical assessments, because it is not sensitive enough to clinically relevant changes. Other attempts have been only speaker-dependent (i.e., trained on an individual's speech) and limited to small sets of keywords that a machine can recognize (Calvo et al., 2020; Mulfari et al., 2021). This research is valuable, for instance, for the development of a

communication aid for speakers with severe dysarthria (c.f., Hawley et al., 2013). But this is not appropriate as a diagnostic method that is supposed to measure reliably and independently of the speaker. Intelligibility measures in speaker-independent scenarios still show low accuracies (e.g., Tripathi et al., 2020). Currently, the human ear is still the most competent tool for measuring disrupted speech, especially concerning communication-related parameters. For example, the human ear easily separates premorbid speech characteristics, such as a speaker's dialect, from disease-related abnormalities (Keshet, 2018). This ability is essential to assess the effects dysarthria has on the naturalness of speech, for example. In addition, when assessing intelligibility, a human listener can disregard audible symptoms that do not convey any content (e.g., audible inspirations). In contrast, the performance of automated speech recognition systems is easily disrupted by pathological speech (Keshet, 2018) and is worse regarding the decoding of dysarthric speech than that of naïve human listeners (Mengistu & Rudzicz, 2011). Above all, machine learning methods still fail to evaluate complex communication-related parameters, such as the naturalness of speech, due to the specifics of the speech disorder.

Even though the impact of dysarthric impairment on communication abilities from the perspective of non-professional, “real-world” interlocutors is a major benchmark in treatment demand and treatment success, there is still a wide gap regarding available tools for its measurement as a clinical standard. As a matter of course, a vast number of experimental studies incorporate the perspective of naïve listeners on communication-related aspects of dysarthric speech because their perspective contributes to high ecological validity (e.g., Anand & Stepp, 2015; Klopfenstein, 2016; McAuliffe et al., 2017; Park et al., 2016; Schölderle et al., 2016; Smith et al., 2019). The commonality of these studies is that based on rigorous criteria, they recruited fixed groups of naïve listeners, most of whom were students examined in the laboratory under the supervision of the researchers. However, when it comes to standard clinical diagnostics, inviting lay people to a laboratory and collecting their judgments is not a feasible option due to financial, time, and organizational constraints (c.f., Gadiraju et al., 2017).

Online crowdsourcing brings the laypersons' perspective into the therapy room

In a time when people are constantly and conveniently connected via the internet, the judgment of the environment on an individual's speech does not have to remain an unattainable secret for therapists. A web-based assessment opens up infrastructural

possibilities that could solve the organizational dilemma and make it possible to capture the laypersons' perspective. This is especially true for assessing speech: under consideration of transmission-related influence factors, speech samples can be easily recorded and distributed digitally for evaluation purposes (c.f., Utianski et al., 2019).

An earlier web-based diagnostic tool intended for clinical use, the Munich Intelligibility Profile (MVP; Ziegler & Zierdt, 2008), presented the first solution to overcome this organizational problem. The MVP system assembled a limited number of listeners in a virtual lab. Listeners were selected from this known group to remotely assess single word productions of PWD in a multiple-choice word identification task. However, in the clinical setting, this approach was found to meet several problems: The listening task was not sensitive enough, there were unexpected learning effects in the listeners, the method was not scalable enough to handle high volumes of diagnostic requests, and there was no unsupervised quality control to ensure the validity of the data. Besides these problems, the MVP system needed a modification related to data protection. Not at least, the assessment was confined to the parameter of intelligibility. However, intelligibility is not the only indicator of communication-related problems in dysarthria (e.g., Atkinson-Clement et al., 2019).

Now, nearly 15 years after the release of the web-based version of the MVP system, not only the operation of the service itself has shown opportunities for improvement. However, there are two other decisive factors that have taken effect: First, there is an extensive body of research that has brought new knowledge about parameters that may indicate communication limitations in persons with dysarthria and about the factors that may influence listeners' perceptions of dysarthric speech (e.g., Allison et al., 2019; Anand & Stepp, 2015; Beverly et al., 2010; Chiu & Forrest, 2018; Klopfenstein, 2015; Klopfenstein, 2016; McAuliffe et al., 2017; McAuliffe et al., 2013). Second, the transformation of the internet has provided us with entirely new commodities for utilizing the "everyday expertise" of naïve listeners in dysarthria assessment. For example, digital *crowdsourcing* platforms, such as Amazon Mechanical Turk, CrowdFlower, or Clickworker, are conveniently usable for everybody. These providers coordinate a large workforce of distributed internet users (i.e., crowdworkers), who are available to complete small tasks that have been placed as an "open-call" by a requester (e.g., Eskenazi et al., 2013). The crowdworkers can easily complete those tasks via mobile devices, which have become daily companions for the majority of people. Taken together, this fulfills the prerequisite for

gaining instant access to a gigantic community of internet users who can be employed as naïve listeners. Therefore, crowdsourcing offers a scalable method for capturing the laypersons' perspective in clinical assessment in dysarthria from the speech therapist's desk.

This gave rise to the overall motivation of this project, which was to fill in the gap in the clinical assessment of dysarthria by making existing, up-to-date digital capabilities suitable to translate the latest research knowledge about how to quantify communication limitations in dysarthria. Although this research is based on the MVP's basic principle of outsourcing and web-based collection of layperson judgments, state-of-the-art digitization and research enables us to build a completely new service, not just recreate the old. In a nutshell, the core idea of this doctoral project relates to a web-based phonetics laboratory service that comprehensively measures communication limitations based on the evaluations of naïve listeners who are recruited via online crowdsourcing.

This concept can be assigned to the field of *telehealth*, also termed *telepractice*², since it is intended to be an application of telecommunications technology that delivers speech-language pathology services remotely (ASHA, 2021). However, as reviews on telepractice use across disorders in the field of speech-language pathology services in adults have revealed, it stands out from the majority of applications. Synchronous telepractice, specifically video conferencing, is the most commonly used remote method to maintain traditional interventions by SLTs (Keck & Doarn, 2014; Molini-Avejonas et al., 2015; Weidner & Lowman, 2020). The motivation for applying information and communication technologies to deliver therapeutic interventions was to overcome limited access to care in remote areas (Constantinescu et al., 2010; Hill et al., 2006; Hill et al., 2009). Recently, the COVID-19 pandemic has required SLTs all over the world to fully switch over to this service delivery modality to meet the imperative of physical distance (Aggarwal et al., 2020; Beushausen, 2021; Chadd et al., 2021).

In contrast, the idea of a crowd-based laboratory service for dysarthric speech differs from these applications in the following ways: First, it is an asynchronous application since speech samples are captured and transmitted for judging by the crowdworkers. Second, it provides a type of assessment that would not be realizable using the standard methods (i.e., in the face-to-face situation between therapist and patient). Third, the naïve listeners are the remote

² The American Speech-Language-Hearing Association (ASHA) established this term to avoid the misperception that these services are used only in health care settings (ASHA, 2021).

“real-world experts” reached via the World Wide Web, whereas the SLTs are physically present only to supervise recording and assessment.

The realization of the idea behind this project is concretized in the following goals.

1.2 Project goals

The project's overall goal was to translate the core idea into a clinically applicable diagnostic instrument for the measurement of communication-related parameters in dysarthria. The instrument is to be named *KommPaS* (German acronym for **C**ommunication related **P**arameters for **S**peech disorders). To accomplish this, the following two goals had to be achieved:

1. The first goal was the development of a test system that provides a technical solution for the core idea presented. This required numerous theoretical and methodological considerations followed by a technical implementation as web application – the *KommPaS Web App* – taking into account state-of-the-art standards for data protection and data security.
2. The second goal was to prove that the proposed approach stands up to the high methodological and psychometrical standards for a diagnostic instrument. The evaluation process required several studies to ensure objectivity from a given number of subjective crowd-based judgments and demonstrate the reliability and validity of the KommPaS approach from different perspectives.

1.3 Outline of the publications

This dissertation consists of five self-contained papers, which, however, build on each other systematically. Table 1.1 summarizes the formal publication details, including the contribution of the doctoral candidate according to the Contributor Roles Taxonomy – (CRediT; Brand et al., 2015).

Table 1.1. Fact sheet on publications

P1 – Web-based assessment of communication-related parameters in dysarthria: Development and implementation of the KommPaS Web App

Authors	Lehner, Katharina ^a Pfab, Jakob ^a Ziegler, Wolfram ^a
Contribution of the doctoral candidate	Funding acquisition, Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Writing - Original draft, Writing - Review & Editing
Journal	Clinical Linguistics & Phonetics (CL&P)
Status	Published
Article history	DOI: 10.1080/02699206.2021.1989490 Submitted: March 2, 2021 Revised: August 23, 2021 Accepted: September 29, 2021 Published Online: October 26, 2021

P2 – The impact of lexical and articulatory factors in the automatic selection of test materials for a web-based assessment of intelligibility in dysarthria

Authors	Lehner, Katharina ^a Ziegler, Wolfram ^a
Contribution of the doctoral candidate	Funding acquisition, Conceptualization, Project administration, Investigation, Data curation, Writing - Original draft, Writing - Review & Editing
Journal	Journal of Speech, Language, and Hearing Research (JSLHR)
Status	Published
Article history	DOI: 10.1044/2020_JSLHR-20-00267 Submitted: May 18, 2020 Revised: July 6, 2020 Accepted: August 13, 2020 Published Online: March 1, 2021

P3 – Crowdsourcing as a tool in the clinical assessment of intelligibility in dysarthria: How to deal with excessive variation

Authors	Ziegler, Wolfram ^{a,1}
---------	---------------------------------

	Lehner, Katharina ^{a,1} KommPaS Study Group ^b (¹ shared first-authorship)
Contribution of the doctoral candidate	Funding acquisition, Conceptualization, Project administration, Investigation, Data curation, Writing - Original draft, Writing - Review & Editing
Journal	Journal of Communication Disorders (JCD)
Status	Published
Article history	DOI: 10.1016/j.jcomdis.2021.106135 Submitted: November 20, 2020 Revised: March 14, 2021 Accepted: June 7, 2021 Published Online: June 17, 2021

P4 – Clinical measures of communication limitations in dysarthria assessed through crowdsourcing: Specificity, sensitivity, and retest-reliability

Authors	Lehner, Katharina ^a Ziegler, Wolfram ^a KommPaS Study Group ^b
Contribution of the doctoral candidate	Funding acquisition, Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Project administration, Investigation, Data curation, Writing - Original draft, Writing - Review & Editing
Journal	Clinical Linguistics & Phonetics (CL&P)
Status	Published
Article history	DOI: 10.1080/02699206.2021.1979658 Submitted: March 8, 2021 Revised: June 1, 2021 Accepted: September 5, 2021 Published Online: November 12, 2021

P5 – Indicators of communication limitation in dysarthria and their relation to auditory-perceptual speech symptoms: Construct validity of the KommPaS Web App

Authors	Lehner Katharina ^{a,1} Ziegler, Wolfram ^{a,1} KommPaS Study Group ^b (¹ shared first-authorship)
---------	---

Contribution of the doctoral candidate	Funding acquisition, Conceptualization, Project administration, Investigation, Data curation, Writing - Original draft, Writing - Review & Editing
Journal	Journal of Speech, Language, and Hearing Research (JSLHR)
Status	Published
Article history	DOI: 10.1044/2021_JSLHR-21-00215 Submitted: April 14, 2021 Revised: July 15, 2021 Accepted: August 26, 2021 Published Online: December 10, 2021

Note. Contribution according to *CRediT – Contributor Roles Taxonomy* (Brand et al., 2015)

Status: December 19, 2021

^a Clinical Neuropsychology Research Group, Institute for Phonetics and Speech Processing, Ludwig-Maximilians-University, Germany
katharina.lehner@phonetik.uni-muenchen.de,
wolfram.ziegler@ekn-muenchen.de,
jakob.pfab@googlemail.com

^b **The KommPaS Study Group comprises the following clinical collaborators:**

Madleen Klonowski, Nadine Geißler (Schön Klinik München Schwabing)
Franziska Ammer, Christina Kurfeß, Holger Grötzbach (Asklepios Klinik Schaufling)
Alexander Mandl, Felicitas Knorr, Katrin Strecker, Theresa Schölderle (Stiftung ICP München)
Sina Matern, Christiane Weck (Krankenhaus Agatharied)
Berthold Gröne† (Kliniken Schmieder Allensbach)
Stefanie Brühl, Christiane Kirchner (St. Mauritius Therapieklinik Meerbusch)
Ingo Kleiter, Ursula Sühn (Marianne-Strauß-Klinik Berg)
Joachim von Eichmann (m&i-Fachklinik Enzensberg)
Christina Möhrle, Pete Guy Spencer (Hegau-Jugendwerk Gailingen)
Rüdiger Ilg, Doris Klintwort (Asklepios Stadtklinik Bad Tölz)
Daniel Lubecki (NeuroKom Bad Tölz)
Steffy Marinho, Katharina Hogrefe (Mutabor e.V.)

Their contribution roles were investigation and resources (patients).

The articles' thematic coherence and their research subjects to reach the project goals are outlined in the following.

Paper 1, “*Web-based assessment of communication-related parameters in dysarthria: Development and implementation of the KommPaS Web App*” (chapter 2), details the steps to achieve the first project goal by providing a comprehensive description of the development process of the KommPaS Web App: Based on considerations regarding the theoretical underpinnings and methodological constraints of a clinical tool for the assessment of communication limitation in dysarthria, P1 elucidates how each theoretically and methodologically motivated feature is translated into test principles and how these principles are technically implemented in a web application. Moreover, the paper reports initial efficiency data and highlights the data privacy and data security provisions that are essential in such an approach.

All subsequent papers contribute to the second project goal. The next two papers start the evaluation process by mainly dealing with the two key elements of the KommPaS workflow: the web-based compilation of test materials (P2) and online crowdsourcing for recruitment of naïve listeners (P3). They both specifically focus on intelligibility in dysarthria.

Paper 2, “*The impact of lexical and articulatory factors in the automatic selection of test materials for a web-based assessment of intelligibility in dysarthria*” (chapter 3), aims to identify the material-based influence factors on intelligibility in dysarthria. Since there is extensive evidence that the linguistic properties of an utterance have a substantial impact, especially on the parameter *intelligibility*, the influencing factors known from the literature are considered in the algorithm developed to compile test sentences for each examination with KommPaS automatically. Based on this, we ask in article P2 whether the controlled material-based factors actually influence intelligibility in dysarthria and whether there are other factors that influence intelligibility in dysarthria but have not been considered in the implemented selection algorithm.

Paper 3, “*Crowdsourcing as a tool in the clinical assessment of intelligibility in dysarthria: How to deal with excessive variation?*” (chapter 4), explores how to constrain the expected high variability of crowd-based judgments with the overall goal to ensure objectivity and make crowdsourcing an applicable instrument for diagnostic purposes. The paper addresses the following three research questions: Which one of four aggregation methods examined fulfills the quality criteria of validity and accuracy most effectively? What is an

economically viable number of crowdworkers that are needed to obtain accurate and valid intelligibility estimates? How sensitive is the proposed aggregation method to undetected spamming?

Thereon, the last two papers evaluate the diagnostic approach “as a whole” by considering all KommPaS parameters, i.e., intelligibility, naturalness, perceived listener effort, speech rate, communication efficiency, and the KommPaS total score, obtained according to the standard protocol. P4 and P5 investigate particularly relevant psychometrical issues, i.e., reliability and validity of the KommPaS scores, to finally achieve the second project goal.

Paper 4, “*Clinical measures of communication limitations in dysarthria assessed through crowdsourcing: Specificity, sensitivity, and retest-reliability*” (chapter 5), investigates if the two key features of the KommPaS approach, i.e., the completely automated, quasi-random selection of test materials and listener panels can be reconciled with the psychometric standards required in clinical diagnostics. In particular, it must be ruled out that the employed ‘controlled diversification’ of listeners and materials has an adverse effect on the discriminatory potential of the test and its retest-reliability. First, regarding the issue of KommPaS’s discriminatory potential, P4 demonstrates the distributional characteristics of the KommPaS parameters in dysarthric speakers and in a neurotypical control group, it develops standardized metrics measuring a speaker’s distance from neurotypical control speakers and it evaluates the overall sensitivity and specificity of the diagnostic concept. Second, driven by the question if the administration of KommPaS is reliable enough to yield similar results when the same patient is tested two times, this paper analyzes the test-retest-reliability in immediately repeated testing.

Paper 5, “*Indicators of communication limitation in dysarthria and their relation to auditory-perceptual speech symptoms: Construct validity of the KommPaS Web App*” (chapter 6), addresses two aspects of construct validity. First, if a comprehensive test profile is to be established, a clarification of the overall pattern of relationships among all diagnostic parameters is required to create a valid and transparent picture of a patient’s limitations and avoid the collection of redundant information. Against this backdrop, P5 reveals the pattern of interrelationships of the communication-related parameters measured with KommPaS. Second, P5 has the purpose of disclosing the influences of the expert-based function-level speech parameters described by the Bogenhausen Dysarthria Scales (BoDyS) on the layperson-based communication-level parameters measured by KommPaS to demonstrate reasonable connections between the two levels of diagnostic perspective.

1.4 Overview of the data collection process

This paragraph provides an overarching view of the data collection process and its link to the papers. It further contains aspects of the entire study protocol that have not yet been considered in the individual papers.

The project as a whole comprised the examinations of

- **54 non-dysarthric speakers** as control group (abbreviated as CON) and
- **100 persons with dysarthria** (abbreviated as PWD).

All speakers gave their **informed consent** for inclusion and data protection before they participated in the study. In addition, the participants from the patient group signed a document releasing the therapists from the obligation of confidentiality. **The Ethics Committee of the Faculty of Medicine at the Ludwig-Maximilians-University Munich approved the study protocol** (Project No. 19-365).

The **CON-group** underwent exclusively **one examination with KommPaS**. For their recruitment, we made calls through various e-mail distribution lists (e.g., senior students of the LMU Munich). In addition, colleagues from the Institute of Phonetics and Speech Processing (IPS), as well as other known volunteers, participated. A total sample of 59 CON-speakers was assessed in several phases from May 2019 to March 2020. Five speakers had to be excluded due to neurological disease ($n = 1$) and articulation or voice disorders ($n = 4$). Inclusion and exclusion criteria and demographic data for this group can be found in Paper 4.

The **PWD-group** was examined using a battery of **four different diagnostic instruments**. In addition to *KommPaS*, the test battery consisted of the *Bogenhausen Dysarthria Scales* (BoDyS; Ziegler et al., 2018), a *self-assessment questionnaire*, and an *expert rating* of the communication impairment by their attending Speech and Language Therapist (SLT). This compilation of tests covered all three perspectives on communication impairment in dysarthria, i.e., the perspective of experts, laypersons, and the affected individuals themselves. The tests were always carried out in the above order. To examine test-retest reliability, a subgroup of twenty patients was examined two times with KommPaS in immediate succession (cf. Paper 4, Study 2). Next to KommPaS, **all tests and questionnaires** were performed **web-based**. The instruments are outlined in the following.

(1) *KommPaS*

The examination procedure of KommPaS is presented in detail in each of the publications. The data of the KommPaS examinations formed the focus of each publication on evaluation (Papers 2 to 5). They were the basis for the multi-stage collection process of layperson judgments through crowdsourcing (Papers 2 to 5) as well as under laboratory conditions (c.f., Paper 3).

From a technical perspective, it is to emphasize here that the KommPaS examinations of the participants were carried out with the prototype of the finalized version of the KommPaS Web App. The finalized version was developed in parallel with the empirical parts of study to finally improve the workflow for both users and moderators by combining all the required functionality into one piece. It is presented in Paper 1 (Figure 3).

The **KommPaS prototype** was created by combining different existing software projects and implementing the missing functionality to build a study-ready version. Figure 1.1 depicts its technical architecture, and it should be briefly presented at this point:

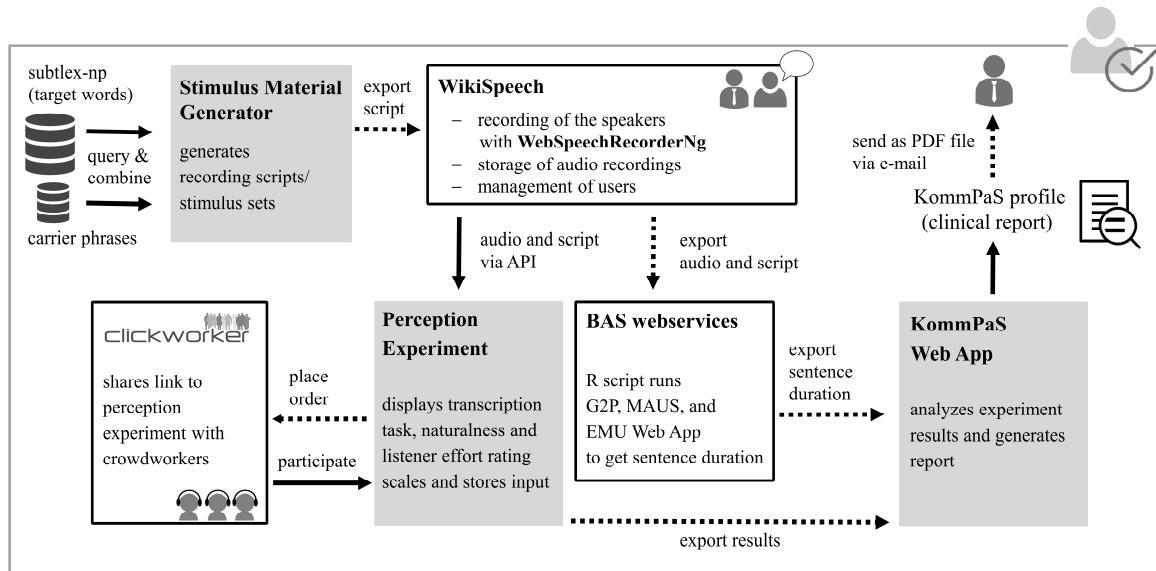


Figure 1.1. Schematic Architecture of the KommPaS prototype.

Note. Solid arrows represent automated actions, dashed arrows manual steps. Boxes depict different software modules within the KommPaS workflow. Unfilled boxes: pre-existing software; grey-shaded boxes: new software.

The following three existing software projects (boxes framed in black in Figure 1.1) were integrated into the workflow of the KommPaS prototype:

- For speaker examination, storage of audio recordings, and user management, the web application **WikiSpeech** (Draxler & Jänsch, 2008) was used. WikiSpeech, in turn,

uses the web version of the SpeechRecorder (Draxler & Jänsch, 2004; Jänsch, 2021) as a speech recording tool to display the text prompts and record the audio files.

- To determine sentence durations, which is relevant for the calculation of communication efficiency scores, the **BAS Webservices** G2P (short for grapheme to phoneme conversion; Reichel, 2012), WebMAUS (short for Munich Automatic Segmentation; Kisler et al., 2017), and the EMU-webApp (EMU Speech Database Management System; EMU-SDMS; Winkelmann et al., 2017) were used and orchestrated by an R script.
- The microtasking platform **Clickworker** was chosen for the recruitment of crowdlisteners. As the KommPaS listener task is standardized (see Appendices 2 and 4), a self-service solution is used. The tasks are offered as a ‘survey’ via the online marketplace, which requires a few manual steps by the moderator for every KommPaS examination (e.g., integration of the individual URLs for the listener task, exclusion of clickworkers on a blacklist (‘spammers’), payment via a prepaid system). The clickworker inputs are automatically stored within the Perception Experiment module (see below).

Three independent tools (grey colored boxes in Figure 1.1) were developed and implemented in the first version to add the required functionality to the KommPaS prototype.

- A **Stimulus Material Generator** (<https://neurophonetik.de/tools/generator/>) written in PHP queries words from the labeled word corpus *subtlex-np* (see Paper 2) stored in a MySQL database and combines them with carrier phrases to generate the recording scripts for the examinations. The selection algorithm follows the constraints described in detail in Paper 2. The recording scripts are manually exported and subsequently imported into WikiSpeech.
- A **Perception Experiment** to run the listening sessions. It consists of an AngularJS frontend to perform the experiment and a small PHP backend to download the audio recordings from WikiSpeech via an API, store the listeners’ input in a PostgreSQL database, and provide an admin interface to download the results. Each perception experiment has a unique random URL that is only accessible when the experiment is set online in WikiSpeech.
- A preliminary version of the **KommPaS Web App** permitted a manual importing of the data from the perception experiment, the meta-information from the recording

script, and the sentence duration data to generate the clinical report. The KommPaS profile chart (see Paper 1, Figure 2 for an example) was implemented using the data visualization framework D3.js. The KommPaS profile is sent to the therapist as a PDF document via email by the moderator.

(2) Bogenhausen Dysarthria Scales (BoDyS)

The *BoDyS* procedure is described in Paper 5 and can also be found in the test manual together with detailed background information on the test (Ziegler et al., 2018).

The web-based execution of *BoDyS*, i.e., presentation of the stimuli and the audio recording of the patient responses, was realized with Wikispeech (Draxler & Jänsch, 2008).

As a function-oriented diagnostic tool of the motor speech disorder, BoDyS provided an external dimension for the evaluation of the KommPaS approach (cf. Paper 5).

(3) Self-assessment questionnaire

The *self-assessment questionnaire* asks patients about their own opinion on the impact of dysarthria. It contains questions about the levels of function, activity, and participation proposed by the ICF (International Classification of Functioning, Disability, and Health; WHO). It is a revision of the questionnaire by Brust et al. (1996), which was also studied, for instance, by Schmich et al. (2010). The modifications for the present application were related to the number of items and the number of answer options. The number of items was reduced from 72 to 39. The number of answer options was increased from a 3 to a 5-point Likert scale. Amongst others, it contains several questions which indicate communication limitation, e.g.

- **Does it happen that the person you are talking to does not understand what you are saying?**
e.g., question 13: My partner and/or my closest relatives understand me
always | rarely not | sometimes not | often not | not at all
- **Do you have the impression that it is effortful for your conversation partners to understand you?**
e.g., question 16: For my partner and/or my closest relatives, it is
not effortful at all | a little effortful | moderately effortful | clearly effortful | very effortful

All questions contained in the modified version can be found in Appendix 1. The questionnaire is still unpublished. None of the papers embedded in this thesis have yet related the self-assessment data to the KommPaS results (see Section 7.3, future work).

(4) *Expert rating*

In the course of the *expert rating*, the attending SLTs gave judgments of the patients' speech intelligibility, naturalness and, their perceived listener effort on visual analog scales without knowing the crowdsourcing results. The queried concepts were parallelized according to the KommPaS parameters. The raw data of the *expert rating* on intelligibility and naturalness are reported in Paper 2, Table 1.

The *self-assessment questionnaire* and the *expert rating* were implemented with the WordPress plug-in "caldera forms" on the website <https://neurophonetik.de/>, which the Clinical Neuropsychology Research Group operates.

For the execution of the tests, each PWD had **one study appointment of 60 minutes** at the respective clinical institution where he or she was receiving inpatient or outpatient therapeutic care at that time. The following **twelve clinical institutions cooperated** in the project, ranked according to the number of patients referred:

- Stiftung ICP München ($n = 21$)
- Asklepios Klinik Schaufling ($n = 16$)
- Schön Klinik München Schwabing ($n = 16$)
- Krankenhaus Agatharied ($n = 10$)
- Kliniken Schmieder Allensbach ($n = 9$)
- Marianne-Strauß-Klinik Berg ($n = 9$)
- Asklepios Stadtklinik Bad Tölz ($n = 7$)
- St. Mauritius Therapieklinik Meerbusch ($n = 6$)
- m&i-Fachklinik Enzensberg ($n = 5$)
- Hegau-Jugendwerk Gailingen ($n = 4$)
- NeuroKom Bad Tölz ($n = 2$)
- Mutabor e.V. – Therapeutische Tagesstätte München ($n = 2$)

These were neurological rehabilitation clinics respectively specialized institutions for the care of certain diseases (e.g., for multiple sclerosis or cerebral palsy). One to three responsible staff members (SLTs, doctors) per institution formed the KommPaS Study Group. The list of names can be found in Table 1.1.

In the period from **July 2019 to February 2020**, a total of 107 patients were enrolled in the study, of which seven patients could not be included in the end. The reasons for **dropout** were:

- no dysarthria detectable (depending on daily form or medication) ($n = 2$)
- German as a second language ($n = 1$)
- severe dementia (impaired understanding of the task) ($n = 1$)
- incomplete signatures of the consent forms ($n = 1$)
- Implementation error by the examiner ($n = 1$)
- cancellation at short notice for organizational reasons ($n = 1$)

In line with the underlying telediagnostic idea, the responsible SLTs on site were asked to perform the test protocol themselves with the patients. Finally, they took over 51/100 examination sessions. This low number was primarily due to time constraints in the clinical routine. We carried out all other examinations.

For a detailed description of the total patient sample, i.e., demographic data, distribution of etiologies, and dysarthria severity, please refer to Paper 2 (Table 1) and Paper 4 (Table 1).

1.5 References

- Ackermann, H. (2018). Neurogene Sprechstörungen (Dysarthrien), S1-Leitlinie, 2018. In Deutsche Gesellschaft für Neurologie (Ed.), *Leitlinien für Diagnostik und Therapie in der Neurologie*. <https://www.dgn.org/leitlinien/3647-ll-030-103-neurogene-sprechstoerungen-dysarthrien-2018>
- Aggarwal, K., Patel, R., & Ravi, R. (2020). Uptake of telepractice among speech-language therapists following COVID-19 pandemic in India. *Speech, Language and Hearing*. <https://doi.org/10.1080/2050571X.2020.1812034>
- Allison, K. M., Yunusova, Y., & Green, J. R. (2019). Shorter Sentence Length Maximizes Intelligibility and Speech Motor Performance in Persons With Dysarthria Due to Amyotrophic Lateral Sclerosis. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 28(1), 96-107. https://doi.org/10.1044/2018_ajslp-18-0049
- American Speech-Language-Hearing Association (ASHA). (2021). *Telepractice*. Retrieved 05/30/21 from <https://www.asha.org/practice-portal/professional-issues/telepractice/>
- Anand, S., & Stepp, C. E. (2015). Listener Perception of Monopitch, Naturalness, and Intelligibility for Speakers With Parkinson's Disease. *Journal of Speech, Language,*

- and Hearing Research, 58(4), 1134-1144. https://doi.org/doi:10.1044/2015_JSLHR-S-14-0243*
- Atkinson-Clement, C., Letanneux, A., Baille, G., Cuartero, M. C., Véron-Delor, L., Robieux, C., Berthelot, M., Robert, D., Azulay, J. P., Defebvre, L., Ferreira, J., Eusebio, A., Moreau, C., & Pinto, S. (2019). Psychosocial Impact of Dysarthria: The Patient-Reported Outcome as Part of the Clinical Management. *Neurodegenerative Diseases, 19*(1), 12-21. <https://doi.org/10.1159/000499627>
- Beushausen, U. (2021). Teletherapie in der Logopädie im deutschsprachigen Raum: Ein Überblick über aktuelle Studienergebnisse. *Forum Logopadie, 35*(3), 6-10.
- Beverly, D., Cannito, M. P., Chorna, L., Wolf, T., Suiter, D. M., & Bene, E. R. (2010). Influence of stimulus sentence characteristics on speech intelligibility scores in hypokinetic dysarthria. *Journal of Medical Speech - Language Pathology, 18*(4), 9+.
- Bhat, C., & Strik, H. (2020). Automatic Assessment of Sentence-Level Dysarthria Intelligibility Using BLSTM. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 14*(2), 322-330. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2020.2967652>
- Borrie, S. A., Lansford, K. L., & Barrett, T. S. (2017). Generalized Adaptation to Dysarthric Speech. *Journal of Speech, Language & Hearing Research, 60*(11), 3110-3117. https://doi.org/10.1044/2017_JSLHR-S-17-0127
- Brand, A., Allen, L., Altman, M., Hlava, M., & Scott, J. (2015). Beyond authorship: attribution, contribution, collaboration, and credit. *Learned Publishing, 28*(2), 151-155. <https://doi.org/https://doi.org/10.1087/20150211>
- Brust, D., Ziegler, W., & Vogel, M. (1996). *Fragebogen zur Beeinträchtigung der Kommunikation als Folge zentraler Sprechstörungen*. EKN-Materialien für die Rehabilitation.
- Calvo, I., Tropea, P., Viganò, M., Scialla, M., Cavalcante, A. B., Grajzer, M., Gilardone, M., & Corbo, M. (2020). Evaluation of an Automatic Speech Recognition Platform for Dysarthric Speech. *Folia Phoniatrica et Logopaedica, 72*(1). <https://doi.org/10.1159/000511042>
- Carmichael, J., & Green, P. (2004). *Revisiting dysarthria assessment intelligibility metrics* INTERSPEECH 2004 - ICSLP, 8th International Conference on Spoken Language Processing, Jeju Island, Korea.
- Chadd, K., Moyse, K., & Enderby, P. (2021). Impact of COVID-19 on the Speech and Language Therapy Profession and Their Patients. *Frontiers in Neurology, 12*(96). <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.629190>
- Chi, Y. F., & Forrest, K. (2018). The Impact of Lexical Characteristics and Noise on Intelligibility of Parkinsonian Speech. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 61*(4), 837-846. https://doi.org/10.1044/2017_jslhr-s-17-0205

- Connaghan, K. P., Wertheim, C., Laures-Gore, J. S., Russell, S., & Patel, R. (2020). An exploratory study of student, speech-language pathologist and emergency worker impressions of speakers with dysarthria. *International Journal of Speech-Language Pathology*, 1-10.
- Constantinescu, G., Theodoros, D., Russell, T., Ward, E., Wilson, S., & Wootton, R. (2010). Assessing disordered speech and voice in Parkinson's disease: a telerehabilitation application. *International Journal of Language & Communication Disorders*, 45(6), 630-644. <https://doi.org/10.3109/13682820903470569>
- Dagenais, P. A., Watts, C. R., Turnage, L. M., & Kennedy, S. (1999). Intelligibility and acceptability of moderately dysarthric speech by three types of listeners. *Journal of Medical Speech-Language Pathology*, 7(2), 91-95.
- DePaul, R., & Kent, R. D. (2000). A Longitudinal Case Study of ALS: Effects of Listener Familiarity and Proficiency on Intelligibility Judgments. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 9(3), 230-240. <https://doi.org/10.1044/1058-0360.0903.230>
- Draxler, C., & Jänsch, K. (2004). SpeechRecorder -- a Universal Platform Independent Multi-Channel Audio Recording Software. LREC, Lisbon.
- Draxler, C., & Jänsch, K. (2008). WikiSpeech - A Content Management System for Speech Databases. Interspeech, Brisbane.
- Duffy, J. R. (2020). *Motor Speech Disorders. Substrates, Differential Diagnosis, and Management* (4th ed.). Elsevier.
- Dykstra, A. D., Hakel, M. E., & Adams, S. G. (2007). Application of the ICF in Reduced Speech Intelligibility in Dysarthria. *Seminars in Speech and Language*, 28(04), 301-311. <https://doi.org/10.1055/s-2007-986527>
- Eskenazi, M., Levow, G.-A., Meng, H., Parent, G., & Suendermann, D. (2013). *Crowdsourcing for speech processing: Applications to data collection, transcription and assessment*. John Wiley & Sons.
- Gadiraju, U., Möller, S., Nöllenburg, M., Saupe, D., Egger-Lampl, S., Archambault, D., & Fisher, B. (2017). Crowdsourcing Versus the Laboratory: Towards Human-Centered Experiments Using the Crowd. In Archambault D., Purchase H., & H. T. (Eds.), *Evaluation in the Crowd. Crowdsourcing and Human-Centered Experiments. Lecture Notes in Computer Science, vol 10264*. Springer.
- Hawley, M. S., Cunningham, S. P., Green, P. D., Enderby, P., Palmer, R., Sehgal, S., & Neill, P. O. (2013). A Voice-Input Voice-Output Communication Aid for People With Severe Speech Impairment. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 21(1), 23-31. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2012.2209678>
- Hill, A. J., Theodoros, D. G., Russell, T. G., Cahill, L. M., Ward, E. C., & Clark, K. M. (2006). An Internet-Based Telerehabilitation System for the Assessment of Motor

- Speech Disorders: A Pilot Study [Article]. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 15(1), 45-56. [https://doi.org/10.1044/1058-0360\(2006/006\)](https://doi.org/10.1044/1058-0360(2006/006))
- Hill, A. J., Theodoros, D. G., Russell, T. G., & Ward, E. C. (2009). The Redesign and Re-evaluation of an Internet-Based Telerehabilitation System for the Assessment of Dysarthria in Adults. *Telemedicine and e-Health*, 15(9), 840-850. <https://doi.org/10.1089/tmj.2009.0015>
- Jänsch, K. (2021). *SpeechRecorderNg*. Retrieved April 18, 2021 from <https://github.com/IPS-LMU/WebSpeechRecorderNg>
- Keck, C., & Doarn, C. (2014). Telehealth Technology Applications in Speech-Language Pathology. *Telemedicine journal and e-health : the official journal of the American Telemedicine Association*, 20. <https://doi.org/10.1089/tmj.2013.0295>
- Keshet, J. (2018). Automatic speech recognition: A primer for speech-language pathology researchers. *International Journal of Speech-Language Pathology*, 20(6), 599-609. <https://doi.org/10.1080/17549507.2018.1510033>
- Kim, H., & Nanney, S. (2014). Familiarization Effects on Word Intelligibility in Dysarthric Speech. *Folia Phoniatrica et Logopaedica*, 66(6), 258-264. <https://doi.org/10.1159/000369799>
- Kisler, T., Reichel, U., & Schiel, F. (2017). Multilingual processing of speech via web services. *Computer Speech & Language*, 45, 326-347. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csl.2017.01.005>
- Klopfenstein, M. (2015). Relationship between acoustic measures and speech naturalness ratings in Parkinson's disease: A within-speaker approach. *Clin Linguist Phon*, 29(12), 938-954. <https://doi.org/10.3109/02699206.2015.1081293>
- Klopfenstein, M. (2016). Speech naturalness ratings and perceptual correlates of highly natural and unnatural speech in hypokinetic dysarthria secondary to Parkinson's disease. *Journal of Interactional Research in Communication Disorders*, 7(1), 123.
- Liss, J. M., Spitzer, S. M., Caviness, J. N., & Adler, C. (2002). The effects of familiarization on intelligibility and lexical segmentation in hypokinetic and ataxic dysarthria. *Journal of Acoustical Society of America*, 112(6), 3022-3030. <https://doi.org/10.1121/1.1515793>
- McAuliffe, M. J., Fletcher, A. R., Kerr, S. E., O'Beirne, G. A., & Anderson, T. (2017). Effect of Dysarthria Type, Speaking Condition, and Listener Age on Speech Intelligibility. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 26(1), 113-123. https://doi.org/10.1044/2016_AJSLP-15-0182
- McAuliffe, M. J., Gibson, E. M. R., Kerr, S. E., Anderson, T., & LaShell, P. J. (2013). Vocabulary influences older and younger listeners' processing of dysarthric speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(2), 1358-1368. <https://doi.org/10.1121/1.4812764>

- Mengistu, K. T., & Rudzicz, F. (2011). Comparing Humans and Automatic Speech Recognition Systems in Recognizing Dysarthric Speech. In Butz C. & L. P. (Eds.), *Advances in Artificial Intelligence. Canadian AI 2011. Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 6657). Springer. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-21043-3_36
- Molini-Avejona, D. R., Rondon-Melo, S., Albuquerque de La Higuera Amato, C., & Samelli, A. G. (2015, 2015/10/01). A systematic review of the use of telehealth in speech, language and hearing sciences. *Journal of Telemedicine and Telecare*, 21(7), 367-376. <https://doi.org/10.1177/1357633X15583215>
- Mulfari, D., Meoni, G., Marini, M., & Fanucci, L. (2021). Machine learning assistive application for users with speech disorders. *Applied Soft Computing*, 103, 107147. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107147>
- Park, S., Theodoros, D., Finch, E., & Cardell, E. (2016). Be Clear: A New Intensive Speech Treatment for Adults With Nonprogressive Dysarthria. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 25(1), 97-110. https://doi.org/doi:10.1044/2015_AJSLP-14-0113
- Reichel, U. (2012). PermA and Balloon: Tools for string alignment and text processing. 13th Annual Conference of the International Speech Communication Association, Portland.
- Schmich, J., Porsche, J., Vogel, M., Kuny, R., Mannsberger, U., Lorenzl, S., Levin, J., & Ziegler, W. (2010). Alltags- und kommunikationsbezogene Dysarthriediagnostik: Ein Fragebogen zur Selbsteinschätzung [Everyday Communication in Dysarthria: A Self-Report Questionnaire]. *Sprache Stimme Gehör*, 34(02), 73-79. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1253383>
- Schölderle, T., Staiger, A., Lampe, R., Strecker, K., & Ziegler, W. (2016). Dysarthria in Adults With Cerebral Palsy: Clinical Presentation and Impacts on Communication. *Journal of Speech, Language & Hearing Research*, 59(2), 216-229. https://doi.org/10.1044/2015_JSLHR-S-15-0086
- Schölderle, T., Staiger, A., Schumacher, B., & Ziegler, W. (2019). The Impact of Dysarthria on Laypersons' Attitudes towards Adults with Cerebral Palsy. *Folia Phoniatrica et Logopaedica*. <https://doi.org/10.1159/000493916>
- Smith, C. H., Patel, S., Woolley, R. L., Brady, M. C., Rick, C. E., Halfpenny, R., Rontiris, A., Knox-Smith, L., Dowling, F., Clarke, C. E., Au, P., Ives, N., Wheatley, K., & Sackley, C. M. (2019). Rating the intelligibility of dysarthric speech amongst people with Parkinson's Disease: a comparison of trained and untrained listeners. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 1-8. <https://doi.org/10.1080/02699206.2019.1604806>
- Tripathi, A., Bhosale, S., & Kopparapu, S. K. (2020, 4-8 May 2020). *Improved Speaker Independent Dysarthria Intelligibility Classification Using Deepspeech Posteriors* International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Barcelona.

- Utianski, R. L., Sandoval, S., Berisha, V., Lansford, K. L., & Liss, J. M. (2019). The Effects of Speech Compression Algorithms on the Intelligibility of Two Individuals With Dysarthric Speech. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 28(1), 195-203. https://doi.org/10.1044/2018_ajslp-18-0081
- Weidner, K., & Lowman, J. (2020). Telepractice for Adult Speech-Language Pathology Services: A Systematic Review. *Perspectives of the ASHA Special Interest Groups*, 5(1), 326-338. https://doi.org/doi:10.1044/2019_PERSP-19-00146
- Winkelmann, R., Harrington, J., & Jänsch, K. (2017). EMU-SDMS: Advanced speech database management and analysis in R. *Computer Speech & Language*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.csl.2017.01.002>
- Ziegler, W., Schölderle, T., Staiger, A., & Vogel, M. (2018). *Bogenhausener Dysarthrieskalen (BoDyS) [Bogenhausen Dysarthria Scales (BoDyS)]*. Hogrefe.
- Ziegler, W., Staiger, A., Schölderle, T., & Vogel, M. (2017). Gauging the Auditory Dimensions of Dysarthric Impairment: Reliability and Construct Validity of the Bogenhausen Dysarthria Scales (BoDyS). *Journal of Speech, Language & Hearing Research*, 60(6), 1516-1534. https://doi.org/10.1044/2017_JSLHR-S-16-0336
- Ziegler, W., & Zierdt, A. (2008). Telediagnostic assessment of intelligibility in dysarthria: A pilot investigation of MVP-online. *Journal of Communication Disorders*, 41(6), 553-577. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2008.05.001>

Part B

2 Paper 1: Web-based assessment of communication-related parameters in dysarthria: Development and implementation of the KommPaS Web App

Reference:

Lehner, K., Pfab, J., & Ziegler, W. (2021). Web-based assessment of communication-related parameters in dysarthria: development and implementation of the KommPaS web app. *Clinical Linguistics & Phonetics*. <https://doi.org/10.1080/02699206.2021.1989490>

3 Paper 2: The impact of lexical and articulatory factors in the automatic selection of test materials for a web-based assessment of intelligibility in dysarthria

Reference:

Lehner, K., & Ziegler, W. (2021). The Impact of Lexical and Articulatory Factors in the Automatic Selection of Test Materials for a Web-Based Assessment of Intelligibility in Dysarthria. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research.* https://doi.org/doi:10.1044/2020_JSLHR-20-00267

4 Paper 3: Crowdsourcing as a tool in the clinical assessment of intelligibility in dysarthria: How to deal with excessive variation

Reference:

Ziegler, W.*, Lehner, K.* & KommPaS Study Group (2021). Crowdsourcing as a tool in the clinical assessment of intelligibility in dysarthria: How to deal with excessive variation. *Journal of Communication Disorders*. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2021.106135>

(*shared first authorship)

5 Paper 4: Clinical measures of communication limitations in dysarthria assessed through crowdsourcing: Specificity, sensitivity, and retest-reliability

Reference:

Lehner, K., Ziegler, W., & KommPaS Study Group. (2021). Clinical measures of communication limitations in dysarthria assessed through crowdsourcing: specificity, sensitivity, and retest-reliability. *Clinical Linguistics & Phonetics*.
<https://doi.org/10.1080/02699206.2021.1979658>

6 Paper 5: Indicators of communication limitation in dysarthria and their relation to auditory-perceptual speech symptoms: Construct validity of the KommPaS Web App

Reference:

Lehner, K.*, Ziegler, W.* & KommPaS Study Group. (2021). Indicators of communication limitation in dysarthria and their relation to auditory-perceptual speech symptoms: Construct validity of the KommPaS WebApp. *Journal of Speech, Language & Hearing Research.* https://doi.org/10.1044/2021_JSLHR-21-00215

(* shared first authorship)

Part C

7 Conclusion

7.1 Summary of the main findings

In this section, the main findings of the five papers are recapitulated.

Paper 1 carved out numerous theoretical and methodological requirements for developing a diagnostic test aimed at reliably assessing communication limitations in persons with dysarthria. The requirements are (a) to capture the manifestations of communication capabilities or limitations on a broad scale (i.e., to derive test scores that are applicable for all persons with dysarthria); (b) to ensure replicability of test scores. This entails controlling for environmental factors, the interlocutors' characteristics and the linguistic properties of the utterance being judged; and (c) to demonstrate the feasibility of the test under everyday clinical conditions.

To be up to par with these requirements, the KommPaS approach was constructed according to the following conceptual architecture: KommPaS is founded on a reductionist concept, i.e., it measures a complex trait such as verbal communication through highly constrained elicitation and evaluation methods. Building upon this fundament, the web-based nature of the KommPaS test represents the supporting pillar since it presents the infrastructural basis for the extension with the following two key components:

- (1) Every new test administered generates a new list of highly diverse but systematically controlled sentences. In this way, expectancies and familiarity effects in the listeners can be avoided and, at the same time, linguistic influence factors can be controlled. The ad hoc compilation of stimulus sets is possible through online accessing of labeled databases consisting of more than 12,000 target words and more than 500 carrier phrases.
- (2) The speech samples are assessed through naïve listeners who are recruited via online crowdsourcing. Crowdsourcing offers a scalable, viable and efficient solution to engage a large group of laypersons in clinical assessment from the speech therapist's desk.

Moreover, Paper 1 reports the data protection and data security precautions that have been taken and are essential for such an approach (also see Appendices 3 and 5).

Paper 2 analyzed the KommPaS intelligibility scores of 100 PWD to see how they are influenced by various lexical and articulatory characteristics of the stimulus material (i.e., lexical frequency, phonological neighborhood structure, articulatory complexity, lexical familiarity, word class, stimulus length, and embedding position). The resulting pattern of influence showed significantly higher intelligibility scores across all dysarthria severity levels for the following: target words with higher frequency, fewer and less frequent phonological neighbors, higher articulatory complexity, and higher lexical familiarity. In addition, target words were more challenging when they appeared in the beginning of the sentence rather than in medial or final position. Stimulus length had mixed effects, whereas word length and word class had no effect.

Concomitantly, these findings represent an evaluation of the systematics for compiling sentence lists implemented in the KommPaS web application: With the exception of word length, all considered factors (i.e., lexical frequency, stimulus length, and embedding position) have an impact on intelligibility. However, the KommPaS algorithm does not consider all of the influential parameters verified in the analysis of Paper 2. Articulatory complexity, lexical familiarity, and lexical neighborhood parameters are not included.

To ensure data quality, Paper 3 proposed a method to constrain excessive variability of crowd-based judgments. The first study reported in this paper revealed that an interworker aggregation method based on negative exponential weightings of the scores as a function of their distance from the ‘best’ listener’s score (an exponentially weighted mean) outperformed three other methods (i.e., median value, arithmetic mean, maximum) regarding *accuracy* (i.e., the stability of the resulting intelligibility estimates across different panels) and *validity* (i.e., the degree to which they matched data obtained under controlled laboratory conditions, which represents the ‘gold standard’). In determining cost-benefits, Study 1 of this paper showed that the optimum panel size of crowd listeners per examination is nine. A second study demonstrated the robustness of this aggregation method against crowd listeners, who are obviously inattentive and, deliberately disregard the instructions. Overall, the studies included in Paper 3 were successful in making crowdsourcing beneficial for diagnostic purposes.

About key psychometric properties of KommPaS, the following picture emerged:

Paper 1 attests to KommPaS a high degree of efficiency regarding three important aspects of the test procedure’s duration. First, the duration for the speaker sessions remained under

15 minutes in 95% of the cases. Second, the listener sessions lasted no longer than 16 minutes in 95% of the cases. Third, the KommPaS profile could be made available to the therapists on the same day in nearly 75% of the cases.

Paper 4 established criterion-referenced cutscores that were calculated from the age-normalized scores for the four KommPaS parameters (i.e., intelligibility, naturalness, perceived listener effort, communication efficiency) and guarantee specificity values of 0.95. The corresponding sensitivity values are highly plausible from a clinical perspective. Moreover, standard metrics for each of these parameters were supplied that denotes a speaker's distance from neurotypical control speakers. This study demonstrated that the KommPaS approach proved to have a high overall accuracy in separating speakers with and without dysarthria: Measured against the KommPaS total score, the sensitivity of the KommPaS approach is 96%, and the specificity is 95%.

Additionally, within the scope of Paper 4, it was shown that the KommPaS test format has a high retest-reliability in immediate succession. This guarantees sufficiently small measurement errors in repeated testing and ensures that noticeable shifts of the test scores reflect meaningful changes in performance (e.g., due to disease progression, fatigue, compensatory strategies, logopedic treatment, or medical interventions).

Finally, Paper 5 presents a proof of construct validity for the KommPaS approach. As part of the internal validation, the investigation elucidated how the KommPaS parameters, i.e., intelligibility, naturalness, communication efficiency, and perceived listener effort, influence each other. Despite high multi-collinearity, each one proved to have its independent justification for being part of the KommPaS test profile. Consequently, the combination of these parameters increases the amount of clinically valuable information and the sensitivity of the test. As part of the external validation, Paper 5 delineated the complex interplay between variables at the functional and communicational levels of dysarthria assessment and demonstrated plausible interconnections in line with earlier findings.

7.2 Contributions to research, clinical practice, and education

Overall, the output of the doctoral project makes a valuable contribution to research, clinical practice, and education.

Regarding **theoretical contributions to research** on motor speech disorders, two issues are particularly noteworthy: Paper 2 makes a significant theoretical contribution by providing a more comprehensive understanding of material-based factors influencing intelligibility in dysarthria. The study is innovative to the extent that it incorporates several well-known factors influencing intelligibility, such as lexical frequency, and less studied ones, such as articulatory complexity. Furthermore, it involves a large sample of patients with dysarthrias of multiple etiologies with varying severity levels. Paper 5 makes another major theoretical contribution. It is the first study to capture the interrelationship between layperson-based, communication-related parameters and expert-based, functional parameters of dysarthric impairment in a unified and comprehensive structural model. This study also unravels the complex dependence of the layperson-based parameters on the expert-based parameters.

Moreover, the project has spawned several **methodological contributions to research**. In general, the research provides an empirical reinforcement for the still scarce validity evidence of crowdsourcing in the field of communication disorders. This work paves the way for using crowdsourcing for a wide variety of questions that seek to obtain laypersons' perspective on communication disorders. In particular, it reinforces the application of crowd-based judgments for clinical assessment of communication disorders. Paper 3 provides a practical methodology for guiding future crowdsourcing applications in this field. This is not only because it has replicated the optimal panel size to be nine listeners (c.f., McAllister Byun et al., 2015) for the KommPaS use case but also because it delivers a detailed derivation of the exponential aggregation method, which can be applied to similar raw data. The successful psychometrical evaluation qualifies KommPaS as an application that provides a reliable and valid outcome measure for clinical trials on dysarthria across different neurological conditions. In fact, KommPaS is currently being used as one of the outcome measures in the project "Dein Haus 4.0" (see <https://www.deinhause40.de/start/>), conducted by the Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Regensburg (Technical University of Applied Sciences Regensburg) and funded by the Bayerische Staatsministerium für Gesundheit und Pflege (the Bavarian State Ministry of Health and Care). Among many other research questions, the project "Dein Haus 4.0" investigates if interventions that use telepresence robots during telepractice and self-training improve the communicative activity of stroke patients.

Moreover, the KommPaS web application is linked to the labeled German word database called *sublex-np* (see Paper 2). Although the database was developed as part of this doctoral

project, it is not restricted to the KommPaS application. Subtlex-np, which is freely available at <https://neurophonetik.de/subtlex-np>, offers several utilization possibilities for research as well as for the treatment of motor speech disorders. Researchers have a large selection of stimulus materials at their disposal for compiling highly controlled word material that works on a wide range of clinical or theoretical research questions. Additionally, the corpus may help tailor treatment materials to individual patients as part of **everyday clinical practice**. This is not limited to dysarthria, however. For instance, the words in the corpus are coded according to their ease of articulation, which has not only an influence on intelligibility in dysarthria but also on the frequency of errors in apraxia of speech. Treatment materials following a hierarchy of articulatory complexity are especially relevant for apraxia of speech (Ziegler et al., 2021).

Another implication of treatment can be drawn from Paper 4. This investigation revealed that the overall communication impairment, reflected by the KommPaS total score, was predicted to a large degree by only three functional speech features (i.e., articulation, prosodic modulation, and voice quality). Therefore, dysarthric impairments affecting these dimensions should be taken particularly seriously in therapy to achieve communication-relevant improvements.

Obviously, in terms of everyday clinical practice, the project's most considerable contribution is that to the assessment of dysarthria. Besides its highly satisfactory psychometric properties, the KommPaS Web App is an available diagnostic tool that was not only developed for the merits of this doctoral thesis as it is actually accessible to therapists and physicians (<https://kommpas-neurophonetik.de/>). The KommPaS profile allocates valuable and complementary informations on dysarthria, which lend themselves as control parameters of treatment effects and yield another perspective for determining the severity of dysarthria and indication for its treatment. Additionally, the profile is designed as a laboratory report – with red areas indicating impairment and green regions indicating no impairment – and, thus, is very intuitive. At a glance, it reveals the patient's communicative limitations and resources. It is also conceivable that therapists will look at the profile together with the patient to illustrate their improvements to them or to motivate the patient to complete technical speech exercises.

Beyond this, a free demonstration of the web application is also available (<https://kommpas-neurophonetik-demo.de/>) for **educational** purposes. It provides the opportunity to get acquainted with the complete process of KommPaS (i.e., from speech recording to listener

rating). It is also intended for future SLTs and researchers to become acquainted with web-based assessment tools in general. In particular, it should give an impetus for students to learn about the importance of the customized measurement of communication limitation in persons with dysarthria and its methodological requirements. Once researchers and SLTs learn of its importance, they have the option to implement it into their treatment plans or research instead of integrating informal and analogue procedures.

7.3 Overall discussion and future work

However, the studies embedded in this thesis and the approach, in general, raise some points of debate and, at the same time, offer several anchor points for future work.

Conducting a layperson-based assessment of communication-related parameters is based on the assumption that SLTs' judgments are biased. The review of adaptation studies supplies sufficient support for this core assumption. However, there is no systematic analysis yet of how exactly the judgments of therapists and laypeople differ, especially an analysis beyond the parameter of intelligibility. Through KommPaS, it is now possible to perform a comprehensive analysis on this issue. We have started to exemplarily resolve this issue with a limited number of patients by relating the KommPaS intelligibility scores to the existing data of the expert-conducted intelligibility ratings (c.f., Section 1.4). The resulting pattern is presented and interpreted in Lehner and Ziegler (2021). As a next step, this analysis will be broadened to include all study patients and communication parameters. However, the experts involved in this project were all the attending therapists with different degrees of familiarity with the individual patient, ranging from a single joint therapeutic session to several years' worth of joint treatments. This examination is expected to come up with further evidence for listeners' adaptation to dysarthric speech over time (e.g., DePaul & Kent, 2000). Afterward, we plan to extend this investigation by incorporating judgments of experts who have profound experience in assessing and treating dysarthria yet are not familiar with the study participants. This should empirically support earlier findings of adaptation to dysarthric speech in general (e.g., Borrie et al., 2017).

As elaborated in Paper 1, it is difficult to force an individual and multifaceted everyday communication into the “corset” of a formal and objective test procedure. This undertaking has necessitated a reduction in the complexity of natural communication situations in order

to be able to express the limitations at a broader scale. As a result of the reductionist approach, it must be assumed that the KommPaS scores do not reflect beneficial or detrimental factors that occur in everyday life that contribute to the success of individual communication situations. For this reason, the investigation of the ecological validity of the KommPaS scores through patient-reported outcome measures (PROMs) represents a crucial amendment to the evaluation of KommPaS. As described in Section 1.4, all PWD who participated in the project completed a self-assessment questionnaire. The KommPaS scores await comparison with these data to investigate the issue of ecological validity.

Paper 2 has a hybrid-type character since it retrospectively examines the factors that influence intelligibility (i.e., after the KommPaS examinations of the study participants have already been made with the previously set rules for the compilation of the stimulus sentences). The study exposed that the KommPaS selection rules do not consider all the influencing factors (see Section 7.1). To compensate for potential imbalances of the disregarded factors, an algorithm could be developed to perform post hoc corrections of intelligibility scores. However, the following facts can refute the need for this: If the compilation of stimulus sets were to be controlled independently for all of these factors, it would create quite a challenge, and it would reduce the number of possible combinations and, thus, the variation of material. Additionally, the results on retest-reliability show that the implemented control mechanism in terms of stimulus materials seems to be thoroughly sufficient.

An expansion of the sample sizes is being planned for several reasons. The group of healthy control participants will be further expanded to establish more robust cutscores (c.f. Paper 3). Moreover, we are currently examining persons with dysarthria due to the following issues: Even though our database was comparatively large and comprised participants representing the most prevalent etiologies of dysarthria, specific populations, such as those with hyperkinetic and dyskinetic syndromes or motoneuron disorders, were underrepresented in the present sample. A selection bias cannot be completely ruled out. For instance, in regard to Paper 5, selection bias may have influenced the occurrence or non-occurrence of specific speech symptoms and, therefore, their predictive pattern on the KommPaS variables. An extension by the underrepresented dysarthria syndromes, such as hyperkinetic or flaccid-paretic dysarthrias, could compensate for this. Above all, a larger and more representative sample of patients with dysarthria of diverse etiologies enables us to establish standard norms.

This project has shown that KommPaS is a feasible diagnostic instrument. However, all examinations were carried out in controlled, quiet surroundings and only with patients in the chronic stage of the disease. Therefore, future work is required to demonstrate the feasibility of KommPaS in other dysarthria treatment settings. That is why we have launched a feasibility study with patients who receive medical care on a stroke unit, (i.e., within the first 72 hours of the stroke). Possible feasibility limitations of KommPaS, due to limited vigilance of the patients, the influence of accompanying symptoms, the handling of the web application, disturbance due to environmental noise, etc., should be systematically reviewed. In addition, the course of dysarthria in the acute phase after stroke will be demonstrated in a multiple single case study. Hence, the feasibility study and the project mentioned above, “Dein Haus 4.0”, afford a possibility to investigate the sensitivity to change of the KommPaS scores. This is an essential addition to the results in regard to retest reliability.

Beyond that, the following points are envisaged:

It is proposed to survey the opinion of SLTs in a future project. On the one hand, we aim to gather user opinions on KommPaS, hoping to learn how their opinions correspond with the KommPaS results and what benefits they perceive. On the other hand, we want to gain an understanding of the SLTs’ acceptability and confidence with telediagnostic assessment tools more generally. It cannot be ruled out that individual therapists have concerns about data protection and the validity of crowd-based judgments and are still insecure in dealing with new digital procedures. Both issues are not in the least decisive for the practical use of the KommPaS web application. Knowledge of this can be used to plan targeted information events or training courses on this topic.

The KommPaS web application offers several possibilities for its further development: The KommPaS web application is a technically flexible tool and, therefore, promotes functional extensions that are expected to be beneficial for diagnostic purposes in dysarthria. For instance, in continuity with an earlier pilot project named *Munich Acoustic Profile* (MAP; Schölderle et al., 2015), a module for measuring perceptual valid and clinically relevant acoustic parameters such as articulation rate, breath pauses, and fundamental frequency (f_0) could be added to further supplement perceptual judgments by objective measures.

Additionally, the telediagnostic principle underlying the KommPaS approach and the engineered infrastructure is not limited to measuring communication-related parameters in adults with dysarthria. Given corresponding methodological adjustments (e.g., of test

materials), the technical infrastructure could be opened up to assess other age groups, for instance, childhood dysarthria. It could also be opened up to assess other communication disorders, such as dysglossia, apraxia of speech, aphasia, dysphonia, articulation impairments, fluency disorders, and hearing loss.

Beyond that, this project could be considered a starting point for putting forward the development and evaluation of machine learning methods to be applied in future work. During the course of this project, we gained a large corpus of more than 3,000 audio samples of dysarthric speech, as well as the corresponding transcriptions and ratings of the human crowd listeners. As a first step, machine learning algorithms could be retrospectively trained and validated based on this data set (c.f., Triantafyllidis & Tsanas, 2019). The aim of doing so would be to measure intelligibility through automatic speech recognition and evaluate the accuracy of predicting naturalness and other communication-relevant parameters in dysarthric speech. However, as a second step within a rigorous study protocol, machine learning algorithms could be implemented into the KommPaS tool to evaluate them in real-life settings (Triantafyllidis & Tsanas, 2019).

7.4 Bottom line

To finally sum up, a web-based diagnostic tool has been created, that functionally maps the formulated core idea of a crowd-based assessment of communication limitations in dysarthria (first project goal). Moreover, it is a scalable and efficient instrument with an intuitive user interface, a largely automated workflow, and modern data privacy and data security features. KommPaS fulfils the high methodological and psychometrical standards for a diagnostic instrument since the obtained scores were proven reliable and valid (second project goal). The formulated project goals could thus be fully met. Taken together, it means that the KommPaS web application is now prepared to make its way into the study protocols of clinical trials and the day-to-day routine of clinics and practices.

Digital structures and remote connections via the internet make it possible to capture perceptions on dysarthric speech from a ‘real-world’ perspective. KommPaS provides the clinician with invaluable information and, thus, closes a significant gap in patient care. Beyond this, the project offers fruitful avenues for further development and future research. Hopefully, this thesis provides an impetus for taking steps toward thoughtful but courageous

development and use of telepractice applications to further enhance the treatment of persons with communication disorders.

7.5 References

- Borrie, S. A., Lansford, K. L., & Barrett, T. S. (2017). Generalized Adaptation to Dysarthric Speech. *Journal of Speech, Language & Hearing Research, 60*(11), 3110-3117. https://doi.org/10.1044/2017_JSLHR-S-17-0127
- DePaul, R., & Kent, R. D. (2000). A Longitudinal Case Study of ALS: Effects of Listener Familiarity and Proficiency on Intelligibility Judgments. *American Journal of Speech-Language Pathology, 9*(3), 230-240. <https://doi.org/10.1044/1058-0360.0903.230>
- Lehner, K., & Ziegler, W. (2021). Online-Crowdsourcing als „KommPaS“ in der kommunikationsbezogenen Dysarthriediagnostik [Online Crowdsourcing as a „KommPaS“ in Communication-Related Dysarthria Diagnostics]. *Sprache Stimme Gehör, 45*(1), 27-31.
- McAllister Byun, T., Halpin, P. F., & Szeredi, D. (2015). Online crowdsourcing for efficient rating of speech: A validation study. *Journal of Communication Disorders, 53*, 70-83. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2014.11.003>
- Schölderle, T., Staiger, A., Hoffmann, B., & Ziegler, W. (2015). Akustische Sprachsignalanalysen in der klinischen Dysarthriediagnostik: Möglichkeiten und Grenzen [Acoustic Analyses of Speech in Clinical Assessment of Dysarthria: Possibilities and Limitations]. *Sprache-Stimme-Gehör, 39*(04), 176-181.
- Triantafyllidis, A. K., & Tsanas, A. (2019). Applications of machine learning in real-life digital health interventions: review of the literature. *Journal of medical Internet research, 21*(4), e12286.
- Ziegler, W., Lehner, K., Pfab, J., & Aichert, I. (2021). The nonlinear gestural model of speech apraxia: Clinical implications and applications. *Aphasiology, 35*(4), 462-484.

Appendix

Appendix 1. Self-assessment questionnaire

Selbsteinschätzung der Kommunikationsfähigkeit bei Dysarthrie

es liegt keine Erfahrung mit der Sprechstörung außerhalb des klinischen Settings vor
dann bitte 6. Psychosoziale Folgen nicht ausfüllen!

1. Stimmliche und artikulatorische Veränderungen

	trifft nicht zu	ein wenig	mittelgradig	deutlich	sehr stark
Seit der Erkrankung...					
(1) ...spreche ich leiser.	<input type="checkbox"/>				
...spreche ich lauter.	<input type="checkbox"/>				
(2) ...ist meine Stimme ist tiefer.	<input type="checkbox"/>				
...ist meine Stimme höher.	<input type="checkbox"/>				
(3) ...hat sich der Klang meiner Stimme verändert.	<input type="checkbox"/>				
(4) ...spreche ich durch die Nase.	<input type="checkbox"/>				
(5) ...spreche ich undeutlicher.	<input type="checkbox"/>				
(6) ...spreche ich langsamer.	<input type="checkbox"/>				
...spreche ich schneller.	<input type="checkbox"/>				

(7)

...habe ich eine veränderte „Sprechmelodie“.

	<input type="checkbox"/>				
--	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

2. Kommunikative Aktivitäten

	wie vorher	etwas seltener	deutlich seltener	kaum mehr	überhaupt nicht mehr
(8) Ich unterhalte mich auch, wenn mehrere Personen am Gespräch beteiligt sind.	<input type="checkbox"/>				
(9) Ich spreche jemanden an.	<input type="checkbox"/>				
(10) Ich erzähle anderen, was ich erlebt oder gelesen oder was ich im Fernsehen gesehen habe.	<input type="checkbox"/>				
(11) Ich telefoniere außer mit meinen Angehörigen auch mit anderen Leuten.	<input type="checkbox"/>				
(12) Ich spreche auch in lauter Umgebung, z.B. auf der Straße, in einer Gaststätte oder der Kantine.	<input type="checkbox"/>				

3. Verständlichkeit bei verschiedenen Gesprächspartnern

Kommt es vor, dass Ihre Gesprächspartner nicht verstehen, was Sie sagen?

	immer	selten nicht	manchmal nicht	häufig nicht	überhaupt nicht
(13) Mein(e) Partner(in) / meine nächsten Angehörigen verstehen mich...	<input type="checkbox"/>				

(14)

Personen, mit denen
ich häufiger Kontakt
habe (z.B. Freunde,
Bekannte, Arbeits-
kollegen, Pflege-
personal, Thera-
peuten, etc.),
verstehen mich...

(15)

Fremde bzw.
Personen, mit denen
ich selten Kontakt
habe, verstehen
mich...

Haben Sie den Eindruck, dass es für Ihre Gesprächspartner anstrengend ist, Sie zu verstehen?

überhaupt nicht anstrengend	ein wenig anstrengend	mittelgradig anstrengend	deutlich anstrengend	sehr anstrengend
-----------------------------------	--------------------------	-----------------------------	-------------------------	---------------------

(16)

Für meine(n)
Partner(in) / meine
nächsten
Angehörigen ist es...

(17)

Für Personen, mit
denen ich häufiger
Kontakt habe (z.B.
Freunde, Bekannte,
Arbeitskollegen,
Pflegepersonal,
Therapeuten, etc.),
ist es...

(18)

Für Fremde bzw. für
Personen, mit denen
ich selten Kontakt
habe, ist es...

4. Verständlichkeit in verschiedenen Situationen

überhaupt nicht	ein wenig	mittelgradig	deutlich	sehr stark
--------------------	-----------	--------------	----------	------------

Ich bin schlechter
verständlich, wenn...

(19)

...ich mich in einer Gruppe unterhalte.

(20)
...ich telefoniere.

(21)
... ich in einer lauten Umgebung spreche.

(22)
...ich müde bin.

(23)
...ich mich nicht anstrengt deutlich zu sprechen.

es liegt KEINE subjektive Beeinträchtigung vor

dann bitte 5. bis 6. nicht ausfüllen!

5. Reaktionen anderer auf die Sprechstörung

nie	selten	gelegentlich	oft	immer
-----	--------	--------------	-----	-------

Wegen meiner Art zu sprechen...

(24)
... falle ich auf.

(25)
... werde ich für aggressiv gehalten.

(26)
... werde ich für depressiv gehalten.

(27)
... werde ich für betrunken gehalten.

(28)
... unterschätzt man meine geistigen Fähigkeiten.

(29)
Meine Gesprächspartner werden ungeduldig.

(30)
Meine Gesprächspartner tun so, als hätten sie mich verstanden.

(31) Ich werde unterbrochen.

(32) Ich werde von Gesprächen ausgeschlossen.

(33) Meine Sätze werden von anderen voreilig ergänzt.

6. Psychosoziale Folgen

	überhaupt nicht	ein wenig	mittelgradig	deutlich	sehr stark
Die Sprechstörung schränkt mich ein...					
(34) ... in der Beziehung zu meinem/meiner Partner/in bzw. meinen nächsten Angehörigen.	<input type="checkbox"/>				
(35) ... in meinen Kontakten zu Freunden/ Bekannten.	<input type="checkbox"/>				
(36) ... neue Bekanntschaften zu machen.	<input type="checkbox"/>				
(37) ... in meinen Freizeitaktivitäten.	<input type="checkbox"/>				
(38) ... in meiner beruflichen Tätigkeit/Ausbildung.	<input type="checkbox"/>				
(39) ... in meiner Selbstständigkeit (Einkäufe, Erledigungen, Ämter, etc.).	<input type="checkbox"/>				

Appendix 2. Written briefing for listeners**„Dein Ohr als Diagnostikinstrument“ – Umfrage im Bereich Logopädie**

Sie hören mehrere Sprachäußerungen von einer erwachsenen Person, die möglicherweise unter einer Sprechstörung leidet. **Ihre Hauptaufgabe besteht darin, Äußerungen anzuhören und aufzuschreiben, was Sie verstanden haben.** Mit Ihrer Teilnahme können Sie helfen, die Versorgung der Betroffenen zu verbessern. Wir suchen Teilnehmer, die keinerlei Vorkenntnisse in diesem Bereich haben.

1. Dauer

Die Umfrage wird voraussichtlich **ca. 10 Minuten** in Anspruch nehmen.

2. Sonstiges

Bitte benutzen Sie unbedingt **Kopfhörer** und führen Sie die Bewertung in einer **ruhigen Umgebung** durch. Beachten Sie, dass sie an der Umfrage **nur teilnehmen** können, wenn Ihre **Muttersprache Deutsch** ist und Sie **keine Hörstörung** haben.

Beachten Sie: die Umfrage funktioniert NICHT

- **mit Safari und Internet Explorer.** Bitte verwenden Sie einen anderen **Internetbrowser (z.B. Chrome, Firefox, Opera, Edge).**
- **mit Tablet oder Smartphone:** Bitte verwenden Sie einen **Desktop-PC oder Laptop.**

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Appendix 3. Commitment to Data Privacy

Durch die Teilnahme an der Umfrage werden personenbezogene Daten für den Auftraggeber im Sinne vom Art 4 Nr. 2 und Art. 28 DSGVO verarbeitet.

(1) Gegenstand, Dauer und Zweck der Verarbeitung

Der Auftrag umfasst die einmalige Bewertung von Sprachaufnahmen von gesunden Sprechern sowie von Patienten mit Sprechstörungen. Die personenbezogenen Daten dürfen für keine anderen, insbesondere nicht für eigene Zwecke benutzt werden.

Die Verarbeitung beginnt mit Aktivieren des Links zur Umfrage und endet nach einmaliger Ausführung der Bewertung.

(2) Pflichten des Auftragnehmers

Der Auftragnehmer verpflichtet sich, alle vertraulichen Informationen dieser Vereinbarung vertraulich zu behandeln und nicht ohne Zustimmung des Auftraggebers an Dritte weiterzugeben oder diese Informationen Dritten zugänglich zu machen. Der Auftragnehmer ist verpflichtet, bei der Erbringung seiner Leistungen für den Auftraggeber die jeweils geltenden datenschutzrechtlichen Pflichten einzuhalten. Dies beinhaltet insbesondere die Einhaltung der Vorschriften der DSGVO und des Bundesdatenschutzgesetzes. Diese Verpflichtungen bestehen auch nach Beendigung des Auftrags fort.

Die Speicherung sowie das Erstellen von Kopien oder Duplikaten der Sprachäußerungen ist nicht zulässig. Der Auftragnehmer wird vertrauliche Informationen, die diese Vereinbarung betreffen, auf Weisung des Auftraggebers löschen und einen Nachweis darüber führen.

(3) Unterauftragsverhältnisse mit Subunternehmern

Eine weitere Subbeauftragung durch den Subunternehmer (z.B. durch eine andere Person) ist nicht zulässig.

Der Auftraggeber behält sich hinsichtlich der Verarbeitung im Auftrag ein umfassendes Weisungsrecht vor.

(4) Technische organisatorische Maßnahmen zum Schutz der personenbezogenen Daten

Der Auftragnehmer ist insbesondere verpflichtet, die erforderlichen Datensicherheitsmaßnahmen (z.B. Sicherung des eigenen Computers durch Passwortschutz) zu treffen und

dies auf Anfrage gegenüber dem Auftraggeber in geeigneter Weise nachzuweisen. Zum Schutz der personenbezogenen Daten ist die Bewertung der Sprachäußerungen nicht in der Öffentlichkeit oder im Beisein anderer beziehungsweise und nur unter Verwendung von Kopfhörern erlaubt.

(5) Mitteilungspflicht des Auftragnehmers bei Störungen der Verarbeitung und bei Verletzungen des Schutzes personenbezogener Daten

Der Auftragnehmer teilt dem Auftraggeber Verletzungen des Schutzes im Auftrag verarbeiteter personenbezogener Daten unverzüglich mit. Hierzu zählt auch der Diebstahl oder Verlust des eigenen Computers, auf dem die Sprachaufnahmen angehört oder bewertet wurden.

(6) Vertraulichkeit und Geheimhaltung

Der Auftragnehmer ist zur Verschwiegenheit verpflichtet und somit neben den datenschutzrechtlichen Schutzmaßnahmen verpflichtet, fremde Geheimnisse zu schützen. Die Offenbarung fremder Geheimnisse, namentlich ein zum persönlichen Lebensbereich gehörendes Geheimnis – oder Betriebs, oder Geschäftsgeheimnis, ist unter Strafe gestellt (§ 203 StGB). Um diese Geheimnisse zu schützen und die Offenbarung auszuschließen, verpflichtet sich der Auftragnehmer zu dieser besonderen Vertraulichkeit und Geheimhaltung.

- Ich habe die Bestimmungen gelesen und stimme zu

Appendix 4. Perception Experiment

Kopfhörer Test

Bitte benutzen Sie unbedingt Kopfhörer und führen Sie die Bewertung in einer ruhigen Umgebung durch!
Im Folgenden können Sie vorab Ihre Einstellungen zum Abspielen der Aufnahmen überprüfen. Sie können die Aufnahme dazu mehrmals anhören.

Zum Starten der Aufnahme klicken Sie auf das Play Symbol.



weiter

Teil 1

Stellen Sie sich vor, wie Sie beiläufig (z.B. in der Bahn oder im Café) hören, wie andere sich unterhalten. Sie achten dabei nicht darauf, was die Leute erzählen.

Sie beurteilen, ob Ihnen die Art, wie die folgende Person spricht in irgendeiner Weise unnatürlich (auffällig, irritierend, eigenartig) vorkommt.
Der Inhalt des Gesagten spielt bei diesem Urteil keine Rolle. Bewerten Sie ganz spontan und nach Ihrer persönlichen Einschätzung.

Zuvor hören sie noch sechs Beispiele. Diese dienen dazu, dass Sie einen Eindruck bekommen, wie unterschiedlich die Natürlichkeit des Sprechens sein kann:

Zum Starten der Aufnahme klicken Sie auf das Play Symbol.



Nun bewerten Sie bitte die Natürlichkeit des Sprechens der folgenden Person:

Sie können die Aufnahme nur ein Mal anhören!



sehr unnatürlich ————— natürlich

Für die Bewertung klicken Sie mit der Maus auf einen Punkt auf der Linie. Scheuen Sie sich dabei nicht, die gesamte Skala, also auch die beiden extremen Werte links und rechts auszunutzen.

weiter

Teil 2

In den folgenden Aufgaben geht es darum, wie gut Sie verstehen, was gesprochen wird. Sie hören jeweils einen Satz und werden danach aufgefordert, eines der Wörter dieses Satzes aufzuschreiben. Sie können jeden Satz nur einmal anhören.

Zum Starten der Aufnahme klicken Sie auf das Play Symbol.

Beispiel:

 Bitte schreiben Sie Blume| in die Lücke.

Was haben Sie verstanden? Tippen Sie das fehlende Wort in die Lücke.

Wenn Sie das Wort nicht verstanden haben oder erraten können, tippen Sie "#" ein.

 Nun folgt | als Zwölftes.



•

•

 Achten Sie jetzt auf Eisdiele| !

 Mit Nummer sechs folgt Bohrloch| .

weiter

Teil 3

Bitte beurteilen Sie, wie anstrengend es insgesamt für Sie war den Inhalt des Gesagten zu verstehen.

Bewerten Sie ganz spontan und nach Ihrer persönlichen Einschätzung.

sehr anstrengend  nicht anstrengend

Für die Bewertung klicken Sie mit der Maus auf einen Punkt auf der Linie. Scheuen Sie sich dabei nicht, die gesamte Skala, also auch die beiden extremen Werte links und rechts auszunutzen.

absenden ➤

✓ alle Eingaben ausgefüllt

Appendix 5. Data Privacy Policy – KommPaS Web App

Datenschutzerklärung KommPaS Web App

Der Schutz Ihrer Daten und der Ihrer PatientInnen hat für uns höchste Priorität. Unter dieser Prämisse wurde die KommPas Web App von Beginn an datenschutzfreundlich konzipiert und schließlich entwickelt.

Über die Nutzung der Webseite und der KommPaS Web App erfassen wir personenbezogene Daten. In der folgenden Datenschutzerklärung erfahren Sie, welche Daten wir erheben, was wir damit machen und wie lange wir diese Daten aufbewahren. Außerdem erhalten Sie Auskunft darüber wie wir Ihre Daten schützen und welche Rechte Sie, Dank der aktuellen Datenschutzgesetze, haben.

Zuallererst möchten wir Sie darauf hinweisen, dass Sie mit uns einen **Auftragsverarbeitungsvertrag** abschließen sollten, da Sie persönliche Daten (Sprachaufnahmen etc.) Ihrer PatientInnen mit der Nutzung der KommPaS Web App verarbeiten lassen. Dieser Vertrag stellt sicher, dass wir die gesetzlichen Bestimmungen gemäß Art. 28 der europäischen Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) hinsichtlich der Erhebung, Verarbeitung und Nutzung von personengebundenen Daten vollständig einhalten. Den von uns unterschriebenen Vertrag können Sie [HIER herunterladen](#). Zeichnen Sie den Vertrag gegen und schicken Sie ihn an info@kommpas-neurophonetik.de. Wir bestätigen Ihnen im Anschluss den Erhalt des Vertrags.

a. Unsere Verantwortung – Wenn Sie Fragen zum Datenschutz haben, oder von Ihren Rechten rund um den Datenschutz Gebrauch machen möchten, können Sie sich jederzeit an unsere Datenschutzverantwortliche wenden:

Katharina Lehner

Email: info@kommpas-neurophonetik.de

Tel: 089 2180 1881

Postanschrift: Institut für Phonetik und Sprachverarbeitung

EKN - Katharina Lehner

Schellingstr. 3

80799 München

b. Ihre Rechte – Sie haben im Zusammenhang mit der Nutzung der KommPaS Web App folgende Rechte:

- Widerrufsrecht (Art. 7 Abs. 3 DSGVO)

Sie können sich an uns wenden, wenn Sie eine zuvor erteilte Einwilligung rückgängig machen möchten.

- Auskunft (Art. 15 DSGVO)

Sie können sich an uns wenden, wenn Sie wissen wollen, welche Daten wir über Sie gespeichert haben.

- Berichtigung (Art. 16 DSGVO)

Sie können sich an uns wenden, wenn Sie bestimmte Daten von Ihnen ändern wollen (z.B. Aktualisierung Ihrer E-Mail-Adresse)

- Löschung (Art. 17 DSGVO)

Sie können sich an uns wenden, wenn Sie möchten, dass wir bestimmte Daten löschen, die wir von Ihnen gespeichert haben (z.B. Ihren Nutzeraccount mit den zugehörigen KommPaS Untersuchungen). Weiter unten finden Sie weitere Informationen zu Löschung und Speicherdauer.

- Einschränkung der Verarbeitung (Art. 18 DSGVO)

Sie können sich an uns wenden, wenn Sie möchten, dass wir Ihre Daten nur eingeschränkt verarbeiten (z.B. keine Bewertung der Sprachaufnahmen über „Dritte“ (Laienhörer))

- Datenübertragbarkeit (Art. 20 DSGVO)

Sie können sich an uns wenden, wenn Sie Ihre bei uns gespeicherten Daten in lesbarer Form (z.B. csv-Format) erhalten möchten.

- Widerspruch (Art. 21 DSGVO)

Sie könnten sich an uns wenden, wenn Sie mit bestimmten Werbe- oder Analyseverfahren nicht einverstanden sind. Aktuell werden diese aber nicht von uns eingesetzt.

- Beschwerderecht (Art. 77 Abs. 1 DSGVO)

Sie können sich mit Beschwerden auch direkt an die Datenschutz-Aufsichtsbehörden wenden.

c. Besuch der Webseite

Wenn Sie sich auf unserer Webseite nur umsehen und informieren möchten, dann werden keine personenbezogenen Daten erfasst, mit Ausnahme der Daten, die Ihr Browser übermittelt, um den Besuch der Webseite überhaupt zu ermöglichen. Diese sind:

- IP-Adresse
- Datum und Uhrzeit
- Zuletzt besuchte Webseite (z.B. google.de)
- Browser (z.B. Chrome oder Safari)
- Betriebssystem (z.B. Mac OS)

Sie werden insbesondere zu folgenden Zwecken verarbeitet:

- Sicherstellung eines problemlosen Verbindungsaufbaus der Website
- Sicherstellung einer reibungslosen Nutzung unserer Website
- Auswertung der Systemsicherheit und -stabilität

Rechtsgrundlage: Die Verarbeitung erfolgt gemäß Art. 6 Abs. 1 lit. f DSGVO auf Basis unseres berechtigten Interesses an der Verbesserung der Stabilität und Funktionalität unserer Website.

Schutzmaßnahme: Die Daten werden gelöscht, sobald diese für den Zweck der Erhebung nicht mehr erforderlich sind. Dies ist für die Daten, die der Bereitstellung der Webseite dienen, grundsätzlich der Fall, wenn die jeweilige Sitzung beendet ist. Empfänger der Daten sind ggf. technische Dienstleister, die für den Betrieb und die Wartung unserer Webseite als Auftragsverarbeiter tätig werden, allen voran der von uns gewählte Anbieter für das Serverhosting (derzeit die 1blu AG).

d. Registrierung als Nutzer

Sie können sich als Logopäde/Logopädin (o.Ä.) für die Nutzung der KommPaS Web App auf unserer Webseite registrieren. Für eine erfolgreiche Registrierung erheben wir folgende Daten von Ihnen:

- E-Mail-Adresse
- Passwort

Zweck: Erstellung eines Benutzerkontos zur Nutzung erweiterter Funktionen auf der Webseite. Die Registrierung erfolgt freiwillig und kann jederzeit widerrufen bzw. die Benutzerdaten gelöscht werden.

Rechtsgrundlage: Einwilligung des Nutzers in Einklang mit den europäischen Datenschutzanforderungen aus Art. 6 Abs. 1 lit. a DSGVO.

Schutzmaßnahme: Die Übermittlung der von Ihnen eingegebenen Daten erfolgt über eine verschlüsselte Verbindung. Nachdem Sie die Daten eingegeben haben erhalten Sie einen Aktivierungslink per E-Mail. Erst nach erfolgreicher Betätigung des Links können Sie sich als Benutzer anmelden. Die Registrierungsdaten werden dann solange gespeichert bis Sie sich entscheiden, das Benutzerkonto zu löschen oder einzelne Daten zu aktualisieren (z.B. E-Mail-Adresse). Falls Sie den Aktivierungslink nicht betätigen, werden Ihre Daten nach 4 Wochen wieder gelöscht.

e. Nutzung der KommPaS Web App

Sprachaufnahmen sind nur dann möglich, wenn Sie den Zugriff der Web App auf Ihr (Headset-) Mikrophon erlauben.

Folgende Informationen werden erfasst und in Ihrem Nutzer-Account gespeichert:

- Untersuchungsdaten
- SprecherIn-ID
- Zeitpunkt der Erstellung einer Untersuchung
- Status der Untersuchung (Entwurf, freigegeben etc.)
- Optionale Eingaben, die Sie eventuell in den Kommentarzeilen machen, d.h. Name der KlientInnen, Ätiologie der Sprechstörung etc.
- Sprachaufnahmen
- Befunddaten („KommPaS-Profil“)

Wenn Sie ein KommPaS-Profil anfordern, erfolgt eine Weitergabe der Audioaufnahmen an die Laienhörer (Crowdworker) der Clickworker GmbH. Die Untersuchungs- und Befunddaten in Ihrem Nutzer-Account (s.o.) werden nicht an Dritte weitergegeben. Die Maßnahmen zum Schutz der Audioaufnahmen finden Sie im folgenden Abschnitt.

f. Wie schützen wir die Sprachaufnahmen?

Nimmt man Sprachäußerungen von PatientInnen auf, handelt es sich – auch ohne inhaltlichen Bezug zur Person – um personenbezogene Daten mit erhöhtem Schutzbedarf, da man aus dem akustischen Signal allein die Person erkennen könnte. Wir haben folgende Vorkehrungen getroffen, dass die Sprachaufnahmen geschützt sind:

- Sichere Datenübertragung: Die Sprachaufnahmen werden ausschließlich über eine sichere https-Verbindung übertragen.
- Zufällige URLs: Für die Übertragung und Bewertung durch die Laienhörer werden die Sprachaufnahmen durch zufällig generierte URLs zugänglich gemacht. Die URLs werden mit einem kryptographisch sicherem Zufallszahlengenerator generiert und schützen die Aufnahmen somit vor unberechtigtem Zugriff.
- Eingeschränkte Nutzung durch die Laienhörer: Die Laienhörer (registrierte Nutzer bei Clickworker GmbH) müssen vor der Bewertung der Sprachaufnahmen einer für die Studie gesonderten Verpflichtungserklärung zum Datenschutz zustimmen. Sie erreichen die Sprachaufnahmen dann nach Zuweisung über die zufällig generierte URL. Die entsprechende URL funktioniert nur für den Zeitraum der Bewertung und wird anschließend inaktiv. Für die Bewertung erfolgt lediglich ein „Stream“ der Audioaufnahmen, es erfolgt somit keine lokale Speicherung auf den Rechnern der Laienhörer.
- Automatische Löschung: Vier Wochen nach Befundübermittlung werden die Sprachaufnahmen automatisch von unserem Server gelöscht. Sie haben davor die Möglichkeit die Sprachaufnahmen herunterzuladen und lokal auf Ihrem Gerät zu speichern. (Die Verantwortung zur Datensicherheit wird dann an Sie übertragen.)

g. Löschung, Speicherdauer und Speicherort

Wir agieren nach dem Grundsatz der Datenminimierung und erfassen nur die tatsächlich erforderlichen Daten. Außerdem verwenden wir datenschutzfreundliche Voreinstellungen und wenden den Grundsatz „Datenschutz durch Technikgestaltung“ an, indem wir etwa von

vornherein auf zusätzliche personenbezogene Daten verzichten und viel Wert auf Verschlüsselung sowie Anonymisierung legen.

Alle Daten, die wir im Rahmen der KommPaS Web App erheben, werden auf einem virtuellen Server mit Serverstandort Deutschland (1blu AG) gespeichert.

Alle oben aufgeführten Nutzer-, Untersuchungs- und Befunddaten werden gespeichert, solange Sie keine Löschung Ihres Accounts anfordern oder eine Berichtigung verlangen.

Untersuchungsdaten (d.h. Audioaufnahmen, Kommentare zu Untersuchungen, Befunddaten etc.) werden gespeichert, solange Sie nicht von Ihnen in Ihrem Account gelöscht werden. Löschen Sie die Daten in Ihrem Account, so werden diese nach einer Frist von 2 Wochen endgültig von unserem Server gelöscht und sind nicht wiederherstellbar. Die Befunddaten werden anonymisiert auf unserem Server gespeichert. Die Sprachaufnahmen werden automatisch vier Wochen nach Befundübermittlung von unserem Server gelöscht. Untersuchungsdaten und Sprachaufnahmen von Untersuchungsentwürfen, d.h. unvollständigen Untersuchungen, die nicht zur Befundung freigegeben wurde, werden ebenfalls automatisch nach vier Wochen gelöscht.

Aus Datenschutzgründen wird Ihr Account mit allen Nutzer- und Untersuchungsdaten nach einem Jahr Inaktivität automatisch gelöscht. Sie erhalten zuvor jedoch eine Erinnerungs-E-Mail, sodass Sie die Löschung noch verhindern können.

Eine Speicherung oder Verarbeitung darüber hinaus ist nur dann möglich, wenn Sie und die betreffenden KlientInnen ausdrücklich schriftlich eingewilligt haben (z.B. im Rahmen von Forschungskooperationen).

h. Zahlungsabwicklung

Wenn Sie Ihr Untersuchungsguthaben aufladen, müssen Sie Ihre Rechnungsanschrift für die Erstellung des Bestellscheins bzw. der Rechnung angeben. Alle Zahlungsdaten werden gemäß der gesetzlichen Aufbewahrungsfrist von 10 Jahren gespeichert.

Zweck: Uneingeschränkte Nutzung der KommPaS Web App, d.h. Anforderung eines kostenpflichtigen KommPaS-Profil (ausgenommen ist die Demoversion der KommPaS Web App).

Rechtsgrundlage: Die Aufbewahrungsfrist für Rechnungen (inkl. Zahlungsdaten) beträgt 10 Jahre nach §14 b Abs. 1 Satz 1 UStG. Die Erhebung der Zahlungsdaten ist nach Art. 6 Abs. 1 lit. b DSGVO („Erfüllung eines Vertrages“) zur Vertragserfüllung und Bereitstellung unserer Dienstleistung erforderlich.

Schutzmaßnahme: Alle Zahlungsdaten werden ebenfalls auf einem virtuellen Server mit Serverstandort Deutschland (1blu AG) gespeichert und nicht an einen externen Dienstleister zur Zahlungsabwicklung weitergegeben. Die Abwicklung erfolgt durch den Träger des KommPaS Projekts (Reha-Hilfe e.V.). Darüber hinaus werden aufgrund des Prepaid-Zahlungsmodells keine vertraulichen Daten wie ihre Kreditkartennummer oder Bankverbindung gespeichert.

i. Cookies

Wir verwenden das Cookie **connect.sid** um Webseitenbesuchern eine Sitzung zuzuordnen und das Anmelden auf der Webseite zu ermöglichen. Dieses Cookie wird für 14 Tage gespeichert. Aktuell werden keine weiteren Cookies gesetzt, auch keine Tracking Cookies oder Cookies von dritten Parteien.

Zusammenfassung [German summary]

Crowdbasierte Messung der kommunikativen Einschränkung bei Dysarthrie: Entwicklung und Evaluation der KommPaS Web App

Hintergrund

Dysarthrien stellen die häufigste neurologisch bedingte Kommunikationsstörung bei Erwachsenen dar. Sie können mit einer Vielzahl von neurologischen Erkrankungen einhergehen, die sich meist erst im Erwachsenenalter manifestieren (z.B. Parkinsonsyndrome, Schlaganfall, Amyotrophe Lateralsklerose), aber auch bereits seit frühester Kindheit bestehen können (z.B. infantile Cerebralparese). Die Schädigungen am zentralen und peripheren Nervensystem führen dabei zu Störungen der Kontrolle und Ausführung von laryngealen, artikulatorischen und respiratorischen Bewegungen, die zum Sprechen notwendig sind.

Bei der Beurteilung der daraus resultierenden, hörbaren Auffälligkeiten im Rahmen der Dysarthrie können zwei unterschiedliche, aber sich ergänzende diagnostische Perspektiven eingenommen werden – die der ExpertInnen und die der Laien.

ExpertInnen, das heißt LogopädInnen oder SprachtherapeutInnen fokussieren in ihrer Beschreibung die *funktionellen Störungsaspekte* des Sprechens. Sie sind darin geschult das Symptommuster der Dysarthrie zu analysieren und beurteilen dazu die Merkmale des Sprechens detailliert in den Bereichen Phonation, Artikulation, Sprechatmung und Prosodie. Das Ziel dabei ist es, die zugrundeliegenden Dysfunktionen zu verstehen, die Störung zu klassifizieren und Anhaltspunkte für eine gezielte Therapie abzuleiten. Im deutschsprachigen Raum gibt es mit den Bogenhausener Dysarthrieskalen (BoDyS) bereits ein standardisiertes und psychometrisch abgesichertes Diagnostikverfahren, das die expertenbasierte, funktionelle Analyse des Sprechens bei Dysarthrie maßgeblich unterstützt.

Diese diagnostische Perspektive erlaubt jedoch keine direkte Vorhersage über die Auswirkungen der Dysarthrie in der Alltagskommunikation. So können beispielsweise keine Aussagen darüber getroffen werden, wie verständlich die Betroffenen für ungeschulte Hörer

sind und wie ihre Sprechweise auf die Umwelt wirkt. Für die Beurteilung der *kommunikativen Einschränkung* ist daher zusätzlich die Einschätzung von *Laien* als „Vertreter der Umwelt“ gefragt. Besonders für Gesprächspartner, die die Person mit Dysarthrie nicht kennen und keine Erfahrung mit Dysarthrie im Allgemeinen haben – sogenannte „naive Hörer“ – sind die Äußerungen häufig schwierig zu verstehen oder sogar unverständlich. Es kann unter Umständen als sehr anstrengend empfunden werden, sich auf das Verstehen des Gesprochenen zu konzentrieren und das langsame und unflüssige Sprechen zu tolerieren. Dies kann wiederum auch dazu führen, dass die Gesprächspartner mit Ärger und Ungeduld reagieren oder genervt und entmutigt sind. Möglicherweise werden Gespräche mit der betroffenen Person sogar gemieden. Die Dysarthrie bedeutet nicht zuletzt immer eine Veränderung der gewohnten Sprechweise. Aus Laiensicht klingt diese häufig unnatürlich oder irritierend und kann in schweren Fällen auch als „bizar“ empfunden werden.

Die Beurteilung der kommunikativen Einschränkung aus Laiensicht stellt eine essenzielle Information für die klinische Diagnostik dar: Sie stellt wichtige Kriterien für die Indikation zur Behandlung bereit, liefert ökologisch valide Kontrollparameter für die Wirksamkeit der Therapie und bietet einen weiteren Schweregradindex für die sprechmotorische Störung.

Obwohl die Bewertungen von naiven Hörern im Hinblick auf kommunikationsrelevante Parameter bei Dysarthrie aufgrund ihrer hohen ökologischen Validität in experimentellen Studien bereits etabliert ist, fanden sie bisher keinen Eingang in die klinische Standarddiagnostik. Dies liegt zum einen daran, dass es aus organisatorischen Gründen im klinischen Alltag kaum umsetzbar ist Laienbewertungen zu erheben. Außerdem benötigt man weit mehr als nur einen/eine Hörer/in pro Testung, um zuverlässig messen zu können. Hinzu kommt, dass die Bewertungen in kurzer Zeit erfolgen müssen, um den Befund für die klinische Arbeit auch nutzen zu können. Zum anderen stellt die Quantifizierung des sehr komplexen Konstruktes der *kommunikativen Einschränkung* eine große methodische Herausforderung dar. Dies lässt sich einerseits aus den zahlreichen experimentellen Studien ablesen, die sich mit den Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung der Dysarthrie durch naive Hörer befassen. Sowie andererseits aus Arbeiten, die unterschiedliche Indikatoren für die kommunikative Einschränkung im Alltag diskutieren und Methoden für deren Beurteilung vergleichen.

Die übergeordnete Intention dieses Promotionsprojektes bestand darin, das Wissen über die Einflussfaktoren auf die Messung der kommunikativen Einschränkung bei Dysarthrie in ein

klinisch anwendbares diagnostisches Instrument zu übersetzen, um so eine große Lücke in der klinischen Dysarthriediagnostik zu schließen. Um dabei den infrastrukturellen Herausforderungen bezüglich der Rekrutierung der Laienhörer zu begegnen, bot sich das Prinzip der Telediagnostik zur Lösung an: Telediagnostik ist seit einiger Zeit fester Bestandteil im medizinischen Alltag, z.B. in der Teleneurologie zur flächendeckenden Schlaganfallversorgung. Dabei bedient man sich meist webbasierter, digitaler Strukturen, um die Unterstützung räumlich entfernter Expertise (z.B. spezialisierter FachärztInnen) zur Diagnosestellung einzuholen. Im Falle der Einschätzung der kommunikativen Beeinträchtigung bei Dysarthrie eignen sich telediagnostische Verfahren dazu, die „Alltagsexpertise“ sprachtherapeutischer Laien zu nutzen. Für die Rekrutierung von LaienhörerInnen zur auditiven Bewertung von Sprechstörungen erwies sich Online-Crowdsourcing als eine vielversprechende Methode. Das Verfahren wurde in der Dysarthrieforschung bereits erfolgreich eingesetzt und bringt valide Einschätzungen hervor. Zusammengefasst war die Kernidee dieses Promotionsprojekts einen webbasierten „Labordienst“ zur Messung kommunikationsrelevanter Parameter bei Dysarthrie zu etablieren, basierend auf den Bewertungen menschlicher LaienhörerInnen, die über Online-Crowdsourcing rekrutiert werden.

Projektziele

Die Umsetzung dieses Vorhabens war an die folgenden zwei Projektziele geknüpft: Das erste Ziel war die Entwicklung eines Testsystems, das die vorgestellte Kernidee funktional abbildet. Dies erforderte zunächst zahlreiche theoretische und methodische Überlegungen bezogen auf die folgenden Fragen: Welche Parameter sollen einbezogen werden um eine möglichst umfassende Beschreibung der kommunikativen Einschränkung zu erhalten, die für alle Personen mit Dysarthrie gültig sein kann? Welche Einflussfaktoren müssen für die Messung berücksichtigt werden, um reproduzierbare Werte zu erreichen? Welche methodischen Grenzen müssen eingehalten werden, um die Durchführbarkeit des Instruments im klinischen Alltag zu gewährleisten? Die Beantwortung dieser Fragen war gefolgt von der technischen Umsetzung in Form einer Web Applikation (Web App). Dabei mussten zusätzlich die aktuellen Standards für Datenschutz und Datensicherheit bedacht werden.

Das zweite Ziel war der Nachweis, dass der entwickelte Ansatz den hohen methodischen und psychometrischen Anforderungen an ein Diagnoseinstrument standhält. Der Evaluationsprozess umfasst mehrere Studien, um die Objektivität der subjektiven Urteile einer Gruppe von Crowdworkern zu gewährleisten sowie die Reliabilität und Validität der Messungen zu demonstrieren.

KommPaS (KommunikationsParameter für Sprechstörungen) – Das Verfahren

Die entwickelte KommPaS Web App ist ein klinisches Beurteilungsinstrument, das vier Indikatoren für die kommunikative Einschränkung bei Dysarthrie quantifiziert. Diese sind *Verständlichkeit*, *Natürlichkeit* und *komunikative Effizienz* des Sprechens, sowie die *subjektive Höranstrengung*, die ein Gesprächspartner beim Verstehen von Äußerungen empfindet. Darüber hinaus wird ein *Gesamtscore* über diese Parameter bestimmt. Das Verfahren zeichnet sich konzeptionell durch drei Hauptmerkmale aus:

- (1) Der gesamte Ablauf, d.h. von der Aufnahme der Sprechproben eines Patienten bis zur Abgabe des klinischen Berichts, ist webbasiert.
Die Realisierung als Web Applikation ermöglicht die folgenden zwei Merkmale.
- (2) Der Abruf des Stimulusmaterials für die Testung erfolgt automatisiert sowie quasi-randomisiert durch Zugriff auf eine große Online-Datenbank bestehend aus mehr als 12.000 Zielwörtern sowie über 500 Trägersätzen. Auf diese Weise können Lerneffekte auf Sprecher- und Hörerseite vermieden und linguistische Einflussfaktoren kontrolliert werden („kontrollierte Variation“).
- (3) Die Beurteilung der Sprechproben erfolgt über Online-Crowdsourcing. Auf diese Weise gewinnt man einen schnellen Zugang zu einer großen Gruppe von Laienhörern („crowdbasierte Telediagnostik“).

Datenerhebung

Das Verfahren wurde im Rahmen einer multizentrischen Studie evaluiert. Diese umfasste die KommPaS Untersuchungen einer Gruppe von 100 Personen mit Dysarthrie unterschiedlicher Ätiologie und Schweregrade (39 weiblich, 61 männlich; $53,3 \pm 18,1$ Jahre)

sowie 54 neurologisch gesunder Sprecher (geschlechts- und altersstratifiziert; 27 weiblich, 27 männlich; $48,3 \pm 16,5$ Jahre).

Überblick über die Publikationen

Diese Dissertation besteht aus fünf eigenständigen Publikationsmanuskripten, die chronologisch aufeinander aufbauen und den KommPaS-Ansatz als gemeinsames Thema teilen. Im Folgenden soll jeweils der Forschungsgegenstand dargestellt werden:

Publikation 1³ („*Web-based assessment of communication-related parameters in dysarthria: Development and implementation of the KommPaS Web App*“) beschreibt die Überlegungen und Schritte zur Erreichung des ersten Projektziels. Der Artikel arbeitet die methodischen Herausforderungen des Vorhabens heraus und liefert, diese berücksichtigend, eine detaillierte Beschreibung des Entwicklungsprozesses der KommPaS Web App. Zudem werden erste Effizienzdaten zum KommPaS Verfahren berichtet.

Die Publikationen 2 und 3 beschäftigen sich jeweils mit einem der obengenannten Schlüsselemente des KommPaS-Ansatzes und fokussieren dabei den Parameter der Verständlichkeit.

Dabei bietet Publikation 2⁴ („*The impact of lexical and articulatory factors in the automatic selection of test materials for a web-based assessment of intelligibility in dysarthria*“) eine umfassende Analyse dazu, welche linguistischen Eigenschaften der Stimuli die Verständlichkeit bei Dysarthrie beeinflussen und damit bei der Messung dieses kommunikativen Parameters berücksichtigt werden müssen. Diese Arbeit stellt zugleich eine Evaluation der in KommPaS implementierten Systematik zur Zusammenstellung der Testmaterialien dar: Zum einen wird die Frage beantwortet, ob die in KommPaS kontrollierten materialbasierten Faktoren tatsächlich die Verständlichkeit bei Dysarthrie beeinflussen. Zum anderen wird aufgezeigt, ob es weitere Faktoren gibt, welche die Verständlichkeit bei Dysarthrie zwar beeinflussen, jedoch im implementierten Algorithmus nicht berücksichtigt wurden.

³ Autoren: Lehner, K., Pfab, J. & Ziegler, W.; Journal: Clinical Linguistics & Phonetics; Status: veröffentlicht (DOI: 10.1080/02699206.2021.1989490)

⁴ Autoren: Lehner, K. & Ziegler, W.; Journal: Journal of Speech, Language, and Hearing Research; Status: veröffentlicht (DOI: 10.1044/2020_JSLHR-20-00267)

Publikation 3⁵ („*Crowdsourcing as a tool in the clinical assessment of intelligibility in dysarthria: How to deal with excessive variation*“) wiederum untersucht, wie man die erwartete hohe Variabilität von crowdbasierten Urteilen einschränken kann, mit dem übergeordneten Ziel Objektivität zu gewährleisten und Crowdsourcing zu einem anwendbaren Instrument für diagnostische Zwecke zu machen. Es werden dazu vier unterschiedliche Methoden zur Aggregation der Crowdurteile gegenübergestellt und hinsichtlich ihrer *Genauigkeit*, das heißt in Bezug auf mögliche Messfehler, sowie ihrer *Validität*, das heißt in Bezug auf die Erhebung der Daten unter Laborbedingungen, verglichen. Darüber hinaus wird die optimale Höreranzahl, die pro Untersuchung notwendig ist, unter Berücksichtigung ökonomischer Gesichtspunkte, ermittelt. Die entwickelte Methode zur Qualitätskontrolle wird schließlich im Hinblick auf ihre Robustheit gegenüber invaliden Urteilen, z.B. infolge von Unaufmerksamkeit oder Missachtung der Instruktionen, geprüft.

Die Publikationen 4 und 5 evaluieren daraufhin die psychometrischen Eigenschaften des diagnostischen Ansatzes, indem sie die eingesetzte Methodik bezüglich der Quasi-Randomisierung des Testmaterials sowie der Aggregierung der Crowdurteile prüfen. Sie berücksichtigen dabei alle KommPaS Parameter und untersuchen die resultierenden KommPaS Werte auf ihre Reliabilität und Validität.

Publikation 4⁶ („*Clinical measures of communication limitations in dysarthria assessed through crowdsourcing: Specificity, sensitivity, and retest-reliability*“) bearbeitet zum einen die Frage, ob KommPaS selektiv genug ist, um eine sinnvolle Unterscheidung zwischen dysarthrischem und nicht-dysarthrischem Sprechen zu treffen. Dazu werden zunächst die Verteilungseigenschaften der KommPaS-Parameter für die Personen mit Dysarthrie sowie für die gesunden Kontrollprobanden aufgezeigt. Darauf aufbauend werden altersnormierte sowie standardisierte Werte für die einzelnen Parameter ermittelt, um den jeweiligen Abstand eines Sprechers zur Kontrollgruppe ausdrücken zu können. Zudem wird die Gesamtsensitivität und -spezifität des diagnostischen Ansatzes evaluiert.

⁵ Autoren: Ziegler, W.*; Lehner, K.* & KommPaS Study Group; *geteilte Erstautorenschaft; Journal: *Journal of Communication Disorders*; Status: veröffentlicht (DOI: 10.1016/j.jcomdis.2021.106135)

⁶ Autoren: Lehner, K., Ziegler, W. & KommPaS Study Group; Journal: *Clinical Linguistics & Phonetics*; Status: veröffentlicht (DOI: 10.1080/02699206.2021.1979658)

Zum anderen wird im Rahmen dieser Publikation analysiert, ob KommPaS zuverlässig genug ist, um bei wiederholter Testung desselben Sprechers mit Dysarthrie vergleichbare Werte zu liefern (Retest-Reliabilität).

Publikation 5⁷ („*Indicators of communication limitation in dysarthria and their relation to auditory-perceptual speech symptoms: Construct validity of the KommPaS Web App*“) behandelt zwei Aspekte der Konstruktvalidität. Zum einen werden die internen Zusammenhänge zwischen allen KommPaS Parametern dargestellt. So lässt sich untersuchen, ob KommPaS ein umfassendes Profil der kommunikativen Einschränkungen liefert, ohne dabei redundante Informationen zu berichten. Zum anderen werden die externen Einflüsse der funktionsbezogenen Symptome, gemessen anhand der BoDyS, auf die kommunikationsbezogenen Parameter, gemessen anhand von KommPaS, beschrieben. Auf diese Weise kann untersucht werden, ob plausible Verbindungen zwischen den beiden diagnostischen Perspektiven bestehen.

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Testgüte

Die Ergebnisse zur psychometrischen Evaluation von KommPaS attestieren dem Verfahren,

- eine hohe Testeffizienz bezüglich der folgenden drei Parameter zur Testdauer: Erstens blieb die reine Testdauer für die Sprecher in 95% der Fälle unter 15 Minuten. Zweitens dauerten die Hörsitzungen für die Crowdworker in 95% der Fälle nicht länger als 16 Minuten. Drittens stand das KommPaS-Profil dem Untersuchenden in fast 75% der Fälle noch am selben Tag zur Verfügung.
- eine hohe Zuverlässigkeit bezüglich der Trennung zwischen gesunden Sprechern und Personen mit Dysarthrie gemessen über den KommPaS-Gesamtscore (Sensitivität: 0,96; Spezifität 0,95).
- eine hohe Retest-Reliabilität im Hinblick auf zwei KommPaS Untersuchungen unmittelbarer Abfolge (ICC (2,1) [95% CI]: 0.97 [0.92-0.99] (*Verständlichkeit*); 0.88 [0.71-0.95] (*Natürlichkeit*); 0.93 [0.83-0.98] (*subjektive Höranstrengung*); 0.98 [0.96-0.99] (*kommunikative Effizienz*); 0.98 [0.95-0.99] (*Gesamtscore*)).

⁷ Autoren: Lehner, K.*; Ziegler, W.* & KommPaS Study Group; *geteilte Erstautorenschaft; Journal: Journal of Speech, Language, and Hearing Research; Status: veröffentlicht (DOI: 10.1044/2021_JSLHR-21-00215)

- eine hohe Konstruktvalidität. Es konnte nachgewiesen werden, dass die einzelnen KommPaS Parameter ihre eigene klinische Relevanz besitzen und zusammengenommen zu einer differenzierteren Beschreibung der kommunikativen Einschränkung beitragen (interne Validierung). Die externe Validierung über die Bogenhausener Dysarthrieskalen (BoDyS) brachte plausible Zusammenhänge zwischen den beiden diagnostischen Ebenen hervor, die durch einschlägige Literatur vorhergesagt wurden.

Schlussfolgerung und Ausblick

Im Rahmen dieses Promotionsprojekts wurde ein webbasiertes Diagnostikinstrument entwickelt, das die Kernidee einer crowdbasierten Messung der kommunikativen Einschränkung bei Dysarthrie funktional abbildet (erstes Projektziel). Darüber hinaus ist die KommPaS Web App ein skalierbares und effizientes Instrument mit einer intuitiven Benutzeroberfläche, einem weitgehend automatisierten Ablauf und einem modernen Datenschutz- und Datensicherheitskonzept. KommPaS erfüllt die hohen methodischen und psychometrischen Anforderungen an einen diagnostischen Test. Die über KommPaS gewonnenen Werte erwiesen sich als reliabel und valide (zweites Projektziel). Die formulierten Projektziele konnten somit vollständig erfüllt werden.

Die KommPaS Web App hat sich für den Einsatz in der praktischen logopädischen Versorgung von Personen mit Dysarthrie sowie als Outcome-Maß im Rahmen von klinischen Studien unterschiedlicher neurologischen Erkrankungen qualifiziert. Die Evaluation des Verfahrens soll in Folgestudien durch eine Standardnormierung sowie den Nachweis seiner ökologischen Validität komplettiert werden.

Acknowledgments

I want to express my deepest gratitude to my primary supervisor, Prof. Dr. Wolfram Ziegler, who invited me on this journey of learning and exploring. He gave me faith to reimplement one of his long-cherished ideas – a phonetics laboratory service for dysarthria. I am grateful for the opportunity to work on this topic; as a therapist, it has motivated me to improve everyday clinical practice, and as a young researcher, it has allowed me to contribute to the extensive area of theoretical and methodological subject matters. My sincerest thanks to Wolfram Ziegler for guiding me along this journey with patience, respect, dedication, humor, and unsurpassed didactic sense and expertise.

I would also like to thank Prof. Dr. Jonathan Harrington for housing my research at the Institute of Phonetics and Speech Processing (IPS) and facilitating constructive discussion about my project during the Doc/Post-Doc Colloquium. An ERC proof-of-concept (PoC) grant awarded to Jonathan Harrington enabled preliminary work on diagnostics of speech impairment via the web, which paved the way for this doctoral project. In addition, many thanks go to my PoC-project collaborators, Dr. Raphael Winkelmann and Dr. Maximilian Hausmann. Both of them brought different perspectives on this subject matter and encouraged me to explore modern tools, which have become essential elements of the KommPaS approach.

This research would not have been possible without technical support and expertise. In this regard, I would particularly like to thank Jakob Pfab, who converted my ideas into lines of code and, thus, brought the app to life. I want to give a big thank you to Jakob Pfab for the easygoing and fruitful collaboration.

Big thanks are also in order for Klaus Jänsch, who put a lot of time and effort into the KommPaS prototype and provided the technical infrastructure of the IPS and, above all, the Web SpeechRecorder – the core tool of KommPaS. In this regard, I want to thank Klaus Jänsch together with PD Dr. phil. Christoph Draxler for making WikiSpeech available for me.

I would also like to extend my gratitude towards my colleagues in the Clinical Neuropsychology Research Group (EKN), who made my time as Ph.D. candidate delightful. I especially want to thank Elisabet Haas, Dr. Theresa Schölderle, Dr. Mona Späth, and Dr.

Hanna Jakob for being friends more than colleagues and for many shared experiences and memories from numerous conferences and many other enjoyable activities inside and outside the EKN. I also wish to thank Dr. Ingrid Aichert, Dr. Nicole Weidinger, Dr. Katharina Hogrefe, and Dr. Anja Staiger for sharing their experiences and expertise, teaching me as a student, and giving me the opportunity to participate in their projects. Furthermore, I want to thank Maria-Magdalena Bauer, Kathrin Leicht, and Renate Kuny for supporting me in collecting and analyzing speech samples.

This project would not have been possible without financial support from the Studienstiftung des Deutschen Volkes, the Bayerische Sparkassenstiftung as well as the Reha-Hilfe e.V.

I am grateful for the substantial support from the KommPaS Study Group's clinical practitioners, who helped organize and execute this project despite their demanding daily routines. I want to thank them for their interest in this modern diagnostic approach and for encouraging their patients to participate in this project.

I owe many thanks to all the persons with dysarthria who contributed to the evaluation of KommPaS despite their serious health conditions. I am equally thankful to all the other volunteers who took part in my experiments. I especially thank them for patiently rating nearly a thousand words according to their lexical familiarity ("What?"), reciting sets of "special" sentences or striving for hours to transcribe speech that was often unintelligible.

My family has been exceptionally supportive. I am deeply grateful to my parents, Maria and Hubert, and my brother, Sebastian, for encouraging me to pursue my interests and offering me advice, optimism, and distraction when I needed them. Their pride in me and their interest in what I do has spurred me on tremendously. Furthermore, their unconditional support and in all facets of my life and their always cheerful manner has sustained me.

Finally, I could not have finished this project without all my friends. My special thanks to Bernadette for being by my side since childhood and providing welcomed distractions to give me a break from my research. My heartfelt thanks to Tobias for giving me advice and for his unwavering positive nature and loving kind. Thank you for sharing the ups and downs with me as I wrote this thesis at home during the endless months of curfew.

Now that I am closing this chapter in my life, I only wish that the bonds formed during these past years will remain strong and strengthen further in the years to come, no matter where my path may take me.