

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Heinz Nixdorf-Lehrstuhl für Medizinische Elektronik

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Bernhard Wolf

Etablierung einer telemedizinisch gestützten bioakustischen Hypertonie–Therapie mittels Virtual Lab

Petra Friedrich

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor – Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Eberspächer

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Bernhard Wolf
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Eckehard Steinbach

Die Dissertation wurde am 14.01.2010 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 12.04.2010 angenommen.

Kurzfassung

Ziel der Arbeit war es, ein virtuelles telemedizinisches Labor, das Virtual Lab, als Entwicklungs- und Erprobungsplattform für personalisierte und individualisierte Therapien zu realisieren. Gleichzeitig wurde mit dieser Entwicklungsumgebung ein neuer systemischer Therapieansatz entwickelt und evaluiert. Es ist eine akustische Biofeedback-Therapie als Regulativ bei primärer Hypertonie. Damit ist es gelungen, eine nicht-medikamentöse Therapie aufzuzeigen, die die Patienten mittels telemedizinischer Blutdruckselbstmessung, automatischer Datenübertragung, Diagnose und Intervention aktiv in die Therapie einbindet. Ausgehend von einer umfassenden Darstellung der telemedizinischen Möglichkeiten in Diagnostik und Intervention folgte zum Schluß die Erörterung der Möglichkeiten und Grenzen vor allem in Bezug auf die Praxistauglichkeit, Usability, Zuverlässigkeit und Stabilität des Systems. Insgesamt wurde ein sensorgestütztes, telemedizinisches, individualisiertes und personalisiertes Assistenzsystem aufgebaut, welches für jeden zugänglich und von jedem nutzbar ist.

Abstract

The objective of this paper was to implement a virtual telemedical laboratory, the Virtual Lab, as a development and testing platform for personalized and individualized therapies. At the same time, a new systemic therapy approach was developed and evaluated in this development environment. This new acoustic biofeedback therapy was found to act as a regulator in patients with primary hypertension. In this way, it was possible to provide a non-pharmacological therapy which actively involves patients in the therapy by enabling a system comprising telemedical self-measurement of blood pressure, combined with automatic data transfer, diagnosis and intervention. Based on a comprehensive presentation of the telemedical possibilities in diagnosis and intervention, the possibilities and limitations, especially in terms of practicality, usability, reliability and stability of the system are discussed at the end of this paper. All in all, it was possible to establish a sensor-based telemedical, individualized and personalized assistance system, which is accessible to everyone and can be used by everyone.

Meiner Mutter,

die mir meine Ausbildung ermöglicht hat und mich in meinen Unternehmungen
immer ermutigt und ausnahmslos unterstützt hat.



Abb. 1: Heilung mit Musik im Mittelalter, Künstler und Quelle sind unbekannt

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	1
2 Feedback und biologische Regelsysteme	12
2.1 Feedback Therapie versus Medikation	14
2.1.1 Symptomatik der Blutdruckregulation	14
2.1.2 Indikation für eine akustische Biofeedback-Therapie	49
2.2 Bedeutung einer Virtual Lab-Struktur	64
3 Stand der Wissenschaft und Technik	68
3.1 Die Evolution der Kommunikationstechnik	68
3.2 Aktueller Stand der Telemedizin	71
3.2.1 Telemonitoring-Komponenten	71
3.2.2 Telemonitoring-Gesamtsysteme	81
3.3 Musik in Medizin und Therapie	83
3.4 Fazit	84
4 Virtual Lab	87
4.1 Laboraufbau	87
4.2 Das akustische Material	92
4.2.1 Ausgangsmaterial	95
4.2.2 Identifizierung der therapeutischen akustischen Muster	96
5 Erprobung und Untersuchungen	107
5.1 Erprobung des Gesamtsystems	107
5.2 Ermittlung „überoptimaler“ Interventionssequenzen	116
5.2.1 Merkmalsextraktion	117
5.2.2 Klassifikator	164

5.2.3	„Überoptimale Sequenzen“	187
6	Zusammenfassung der Analysen und Ergebnisse	190
6.1	Eingesetzte Technik	190
6.2	Akustische Wirkparameter	190
6.3	Medizinische Resultate	191
6.4	Akzeptanz, Therapietreue, Nutzerfreundlichkeit	191
7	Diskussion: Möglichkeiten und Grenzen des Virtual Lab	194
7.1	Der telemedizinische Ansatz	194
7.2	Das Virtual Lab	201
7.3	Die akustische Biofeedback-Therapie	208
8	Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick	214
8.1	Zusammenfassung	214
8.2	Schlussfolgerungen	216
8.3	Ausblick	217
8.3.1	COMES®	217
8.3.2	Ton und Tonus	219
8.3.3	Virtual Reality	221
8.3.4	Zukunftspotential	222
A	Originaldaten	227
A.1	Relationales Datenbankmodell	227
A.2	Fragebogen	229
B	Musikauswahl	234
B.1	Ergotrope Musik	234
B.2	Trophotrope Musik	235
C	Musikalische Merkmale	238
C.1	Psychoakustische Merkmale	238
C.2	Dynamische Merkmale	241
C.3	Rhythmus-basierte Merkmale	244
C.4	Harmonische Merkmale	246
C.5	Basismerkmale im Zeitbereich	249

C.6 Basismerkmale im Frequenzbereich	250
D Ergebnisse der Diskriminanzfunktion	252
E Publikationsliste	255
Abbildungsverzeichnis	260
Tabellenverzeichnis	265
Literaturverzeichnis	267

Vorwort

Diese Arbeit ist am Heinz Nixdorf-Lehrstuhl für Medizinische Elektronik der Technischen Universität München entstanden und ursprünglich aus dem Projekt „Der Arzt im Gepäck“ hervorgegangen. Meine Mitwirkung in diesem Projekt verdanke ich auch der Bereitschaft des Geschäftsbereiches Communications der Siemens AG, später Siemens Enterprise Network Communications GmbH & Co.KG, mich für dessen Laufzeit zu beurlauben und somit einer wissenschaftlichen Tätigkeit an der TU München nachzugehen. Das Projekt wurde zu Teilen von Siemens Communications finanziell unterstützt.

Für die Initiierung und Betreuung des Projektes danke ich Prof. Dr. Bernhard Wolf. Der intensive wissenschaftliche Diskurs mit ihm während der gesamten Zeit war mir eine sehr wertvolle Hilfe und Unterstützung.

Die messtechnische Ausstattung in Form von telemedizinfähigen Blutdruckmessgeräten konnte ich dankenswerterweise bei Alexander Scholz, meinem Kollegen und Geschäftsführer der Sensor GmbH, beziehen. Die Zusammenarbeit mit ihm und seinen Mitarbeitern war mir eine große Hilfe, denn die Geräte für das Virtual Lab und deren reibungsloses Funktionieren war eine grundlegende Voraussetzung für das Gelingen dieses Projektes.

An dieser Stelle bedanke ich mich ganz herzlich bei unseren Industriepartnern, vor allem bei Stefan Tübinger, Geschäftsführer der Synergy Systems GmbH. Er war sofort von der Idee und dem Konzept überzeugt. Ohne seine Förderung und sein hohes Engagement für dieses Projekt, vor allem für die Datenbank, hätte ein zentraler Bestandteil gefehlt. Dr. Winfried Tiedge, Geschäftsführer der Pasife GmbH, gilt ebenfalls mein Dank. Er hat mir mit seiner steten Diskussionsbereitschaft und mit vielen praktischen Ratschlägen geholfen. Mein ganz besonderer Dank gilt dem leitenden Psychologen Reinhard Weber sowie dem Chefarzt der Psychosomatik Dr. med. Philipp Martius und den Ärztlichen Direktoren der Kardiologie Prof. Dr. med. Gernot Klein und Prof. Dr. med. Bernhard Schwaab der DRV Bayern-Süd Klinik Höhenried gGmbH, die uns von Anfang an in diesem Projekt unterstützt und mir sehr wertvolle Hinweise

und Kenntnisse vermittelt haben. Besonders ihr medizinisches Urteil und vor allem die Bereitstellung von Probanden für die Phase der klinischen Erprobung waren von besonderer Bedeutung.

Allen Probanden, die an den Versuchen mitgewirkt haben, danke ich vielmals für ihre Bereitschaft zur Teilnahme und ihre überdurchschnittliche Therapietreue. Die ausgiebigen Rückmeldungen jeglicher Art zu System und Therapie sowie ihre Geduld, sich über mehrere Wochen hinweg regelmäßig das gleiche Musikstück anzuhören, waren eine unschätzbare Hilfe und ein essentieller Bestandteil dieser Arbeit.

Mein Dank gilt auch meinen Kolleginnen und Kollegen am Heinz Nixdorf-Lehrstuhl für Medizinische Elektronik und dem Innovationszentrum für Medizinische Elektronik in München wie auch allen nicht namentlich genannten Förderern und Unterstützern. Nicht zuletzt danke ich all meinen studentischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für ihre eifrige Mitwirkung und ihre wichtigen Beiträge zu dieser wissenschaftlichen Arbeit.

München, den 8. Januar 2010

Petra Friedrich

1 Einleitung

Telemedizin, medizinische Diagnose und Therapie über Entfernungen hinweg, setzt auf den bereits in den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts entstandenen Telemetrie-Entwicklungen auf. Sie verbindet heute moderne Formen der Informations- und Kommunikationstechnik mit medizinischen Diagnose- und Therapieverfahren.

Während gegenwärtig überwiegend noch elektronische Fieberthermometer und Blutdruckmessgeräte, bei Diabetikern Glucometer, die messtechnische Ausstattung eines Durchschnittshaushaltes bestimmen, kann die Fusion biomedizinischer Sensorik mit Systemen der Telekommunikationswelt zu neuartigen Diagnose- und Therapiesystemen führen. Durch den konsequenten Einsatz mikroelektronischer Technik ist es möglich, Daten wie Blutdruck, biochemische oder physikalische Parameter autonom zu messen und über Datenaustausch zu verifizieren. Dies erlaubt die Analyse komplexer gesundheitlicher Zusammenhänge. In der geschickten Kombination von aktueller Sensorik und modernen Informations- und Kommunikationstechnologien, die in der übrigen technischen Welt in den vergangenen Jahrzehnten bereits enorme Effizienzpotenziale generiert haben, stecken beachtliche Kosteneinsparungs- und Qualitätspotenziale auch im medizinischen Bereich [206]. Die Voraussetzung für das Erzielen solcher Effekte ist jedoch, dass die präzise sensorische Erfassung biomedizinisch relevanter Daten möglich ist und mittels entsprechender autonomer Systeme auch die Intervention über telematische Strukturen erlaubt.

Das Projekt „Der Arzt im Gepäck“ hat diese Entwicklungen am Heinz Nixdorf-Lehrstuhl für Medizinische Elektronik bereits vor über zehn Jahren [205] angestoßen und wurde anschließend zu einem Ambient Medicine[®] Konzept¹ ausgebaut. Die Philosophie dabei ist, medizinische Diagnose und Interventionen zu jeder Zeit und an jedem Ort verfügbar zu machen. Dahinter stehen sensorgestützte Strategien, die es möglich machen, in Verbindung mit telematisch orientierten Datenbanken individualisierte und

¹ Ambient Medicine ist eingetragenes Warenzeichen des Heinz Nixdorf-Lehrstuhls für Medizinische Elektronik

personalisierte Diagnose- und Therapiekonzepte zu realisieren. Mit dieser telemedizinischen Versorgungsplattform, wie in Abbildung 1.1 dargestellt, ist es möglich, nahezu den gesamten allgemeinärztlichen Diagnosebedarf abzudecken und zukünftig über trainierbare Expertensysteme telematische Beratungen und Hilfeleistungen anzubieten.

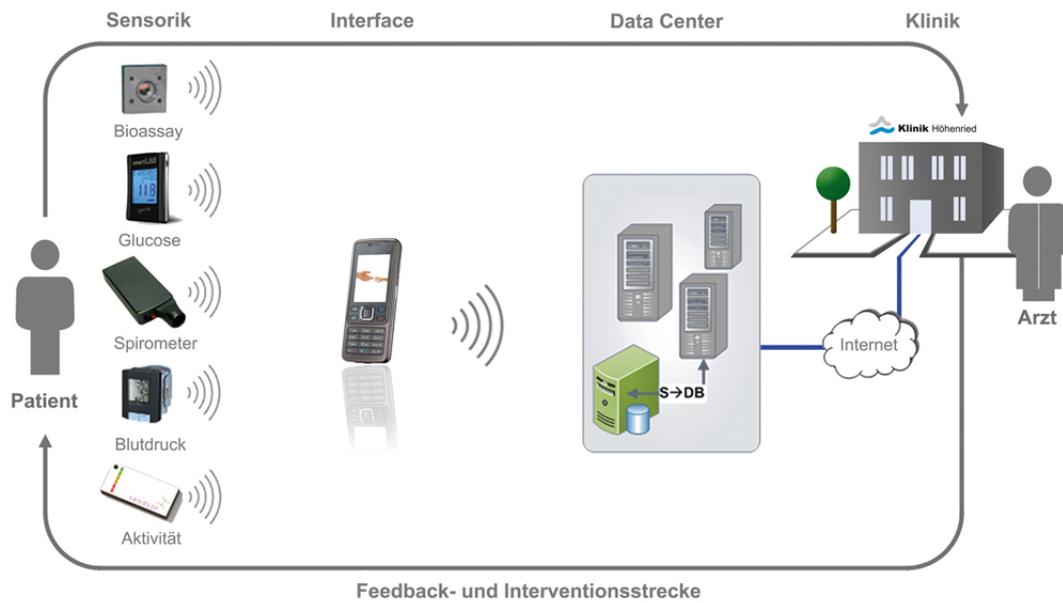


Abb. 1.1: Die Ambient Medicine® Plattform zur telemedizinischen Versorgung

Solche personalisierten sensorgestützten IT-Systeme helfen dabei, dem Patienten einerseits die notwendige diagnostische Sicherheit zu vermitteln, und andererseits eine schnelle und kostengünstige Intervention im Bedarfsfall zu ermöglichen. Nicht nur ältere Menschen, sondern auch die zunehmende Zahl an chronisch Kranken oder Menschen mit transienten Befindlichkeitsstörungen profitieren von diesem Ansatz. Automatisierte wissensbasierte Systeme unterstützen die Selbstdiagnose und den Heilungs- oder akuten Therapieprozess.

Je nach Anwendungsfall können diese Systeme über Festnetztelefone, Mobiltelefone, WLAN und andere Schnittstellen kommunizieren, um die Daten sicher an den relevanten Ort zu transportieren. Dies kann auch die allgemeinärztliche Praxis sein, wodurch bei sinnvollem Einsatz die Routinearbeit des Arztes erleichtert wird und er sich stärker auf die kritischen Fälle konzentrieren kann. Eine individualisierte und personalisierte sensorgestützte Diagnostik kann eine realistische Abbildung vieler Krankheitsbilder

liefern und sogar soweit entwickelt werden, dass dem Patienten über evidenzbasierte und personalisierte Datenbankstrukturen unmittelbare Hilfe geleistet werden kann. So ist es in vielen Fällen für den Patienten ausreichend, auf der Basis seiner akuten Daten eine Verhaltensempfehlung zu bekommen die es ihm ermöglicht, mit der Befindlichkeitsstörung adäquat umzugehen. Diese Information können auch Gesundheitsdienstleister liefern, die über die notwendigen Daten des Patienten verfügen und gegebenenfalls mit dem Patienten in einem länger währenden Betreuungsverhältnis stehen.

Wichtigstes Kriterium bei akuten Befindlichkeitsstörungen ist der unmittelbare Zugang zu ärztlichem Wissen und entsprechender Beratung. Damit der sich nicht unmittelbar vor Ort befindliche Arzt die Störung richtig einschätzen kann, benötigt er sichere Basisdaten wie beispielsweise Blutdruck, Herzfrequenz, Temperatur, metabolische Werte wie u.a. Glucose und Gewicht sowie gegebenenfalls einen optischen Zugang.

Kernelement der Ambient Medicine[®] Plattform ist die multiparametrische telematische Sensorenplattform mit miniaturisierten Sensoren die in Verbindung mit telemetrischer, kabelloser Datenübertragung behandlungsrelevante Messwerte des Patienten erfassen und gleichzeitig dem behandelnden Arzt zur Verfügung stellen. Diese Medizingeräte werden automatisiert, mittels verschiedener Übertragungstechnologien vernetzt und an ein Datenbanksystem angeschlossen. Abbildung 1.2 zeigt das am Heinz Nixdorf-Lehrstuhl für Medizinische Elektronik entwickelte ursprüngliche System, das Telemetric Personal Health Monitoring oder TPHM[©]-System. Es ermöglicht eine kontinuierliche Gesundheitsüberwachung, erhöht die Patienten – Compliance und erleichtert die Dokumentation. Dadurch kann die Therapie individuell abgestimmt werden und Veränderungen des Gesundheitszustandes können frühzeitig erkannt werden. Die Patienten haben den Vorteil, dass sie sich während einer Behandlung ohne Einschränkungen in ihrer gewohnten Umgebung bewegen können und diese gleichzeitig aktiv unterstützen.

Funktionsweise

Die vom Patienten in authentischer Umgebung mit einem sensorgestützten, mobilen Messgerät selbst erhobenen Daten werden per Bluetooth automatisch zum Mobiltelefon gesendet, dann sicher per E-Mail über das Mobilfunknetz gemäß der aktuellen

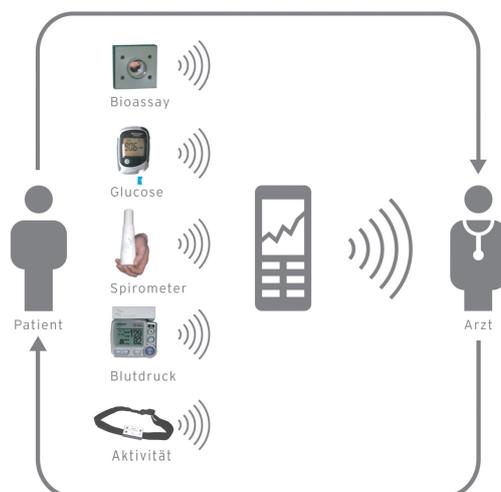


Abb. 1.2: Das Telemetric Personal Health Monitoring - System

Übertragungsstandards (GPRS, EDGE, UMTS) direkt in eine Datenbank übermittelt, siehe Abbildung 1.1 und 1.2. Diese Datenbank ist in ein Data Center integriert, das über alle bekannten Funktionalitäten und Sicherheitsmechanismen eines modernen Rechenzentrums verfügt. Alle autorisierten Personen wie z.B. der behandelnde Arzt und der Patient selbst erhalten nach einer entsprechenden Authentifizierung einen gesicherten Zugriff auf die Datenverläufe des Patienten. Die medizinisch geschulten und ausgebildeten Mitarbeiter im Kompetenz - oder Telemedizin-Center können nun, gestützt auf die patientenspezifischen physiologischen Messdaten, mittels einer vorgegebenen strukturierten Befragung weitere Informationen vom Patienten mündlich einholen und diese über eine Wissensdatenbank abgleichen. Dies ermöglicht dem Arzt einerseits ein umfassendes Monitoring des Krankheitsverlaufes und des Therapieprozesses sowie andererseits unmittelbare Diagnose- und Interventionsmöglichkeiten.

Weitere Realisierungskonzepte setzen für die Datenübertragung zwischen Sensor und Endgerät andere Funkstandards wie z.B. ZigBee oder NFC ein. Alternativen zum Mobiltelefon können beispielsweise ein PDA² oder eine Basisstation mit Anschluss an das Festnetz oder Mobilfunknetz sein.

Die Plattform kann mit beliebigen weiteren Sensoren erweitert werden. Es stehen mittlerweile für alle wesentlichen medizinischen Parameter entsprechende Messgeräte zur

² PDA - Personal Digital Assistant

Verfügung. Mit dieser Vielfalt lassen sich nahezu beliebige sensorgestützte telemedizinische Konzepte für Diagnostik und Therapie verwirklichen. In Kapitel 3 werden die relevantesten der international bekannten Realisierungen und Installationen detailliert vorgestellt. Der Fokus liegt auf Systemlösungen für kardiologische Erkrankungen, speziell der arteriellen Hypertonie und damit zusammenhängende weitere Indikationen wie beispielsweise Diabetes mellitus, Adipositas, metabolisches Syndrom oder Schlaganfall.

Sensorgestützte telematische Assistenzsysteme wie die Ambient Medicine[®] Plattform bieten zu jeder Zeit und an jedem Ort Sicherheit und Hilfe durch Information, Feedback und Kommunikation. Ferner tragen sie bei zur:

- Unterstützung der Prävention
- Verstärkung der Rehabilitation
- Förderung der Emanzipation der Patienten
- Verbesserung der medizinischen Versorgung
- Erhöhung der Lebensqualität
- Leistung eines maßgeblichen Beitrags zur Kostensenkung

mit Einsatzgebieten in:

- Telemonitoring
- Telediagnostik
- Teletherapie
- Telekonsultation

Durch die heutigen vielfältigen Möglichkeiten der Informations- und Kommunikationstechnik können nutzer- und zielgruppenspezifische Produkte, Systeme und Dienste aufgebaut und bereitgestellt werden. Einen allgemeinen Überblick eines telemedizinischen Gesamtsystems gibt Abbildung 1.3, die ausführliche Beschreibung erfolgt in Kapitel 3.



Abb. 1.3: Allgemeine Systemübersicht eines telemedizinischen Gesamtkonzeptes. Grafik entnommen aus [175]

Virtual Lab — Therapieforschung im authentischen Umfeld

Die telemedizinische Verfolgung essentieller Vitalparameter ist eine unabdingbare Voraussetzung zur effizienten Gestaltung personalisierter Interventionsstrecken. Fast allen Ansätzen ist gemein, dass über diese Systeme Daten nur vom Patienten zum Arzt übertragen werden, jedoch nicht umgekehrt. Es besteht somit keine Möglichkeit dem Patienten ein Feedback zu geben bzw. bei kritischen Werten der Parameter zu intervenieren. Deshalb ist es Ziel dieser Arbeit die oben beschriebene Ambient Medicine® Plattform als ein virtuelles telemedizinisches Labor mit automatisierbarer Interventionsstrecke aufzubauen. Damit wird erstmals die Übermittlung von Feedback an den Patienten möglich. Der wesentliche Vorteil eines telemedizinischen Systems mit Interventionsstrecke liegt in der schnellen, aus der Datenanalyse abgeleiteten Intervention, Handlungs- oder Therapieempfehlung, die sofort vom Arzt zum Patienten übertragen wird.

Jeder zweite Todesfall in Deutschland ist auf Herz-Kreislauf-Erkrankungen zurückzuführen. Einer der zentralen Risikofaktoren für kardiovaskuläre Erkrankungen ist die arterielle Hypertonie. In Deutschland leiden etwa 40 Prozent der Bevölkerung an Bluthochdruck. Gemessen an der Rolle, die der Bluthochdruck bei der Todesursache „Herzinfarkt“ spielt, ist der Behandlungsgrad in Deutschland nach wie vor gering [134]. Außerdem liefern einzelne Blutdruck-Messungen nicht immer verlässliche Angaben: Der Blutdruck unterliegt im Tagesverlauf natürlichen Schwankungen. Untersuchungen beim Arzt oder in der Klinik können das Ergebnis verfälschen, da unter Stress der Blutdruck steigt – ein als „Weißkitteleffekt“ bekanntes Phänomen. Zur Vermeidung dieser Effekte ist die regelmäßige Selbstkontrolle des Blutdrucks mit einem wie in Abbildung 1.4 dargestellten System ein wirksames Mittel. Das Blutdruck-System besteht aus einem medizinischen Sensor oder medizinischen Messgerät und einer integrierten Einheit (Funkmodul), die die Daten schnurlos an ein Endgerät weiterleitet, etwa ein Mobiltelefon oder einen Personal Digital Assistant. So kann der Patient die Werte jederzeit und sofort als Grafik auf einem Display betrachten. Der Arzt hat zugleich die Möglichkeit, häufiger und über einen längeren Zeitraum hinweg die medizinischen Gesundheitsparameter des Patienten zu erfassen – auch ohne direkten Patientenkontakt. Weiterhin bietet das *Virtual Lab* einen Lösungsansatz, um sowohl der erhöhten Mobilität von Patienten und medizinischem Personal als auch den steigenden Erwartungen an ebenso ubiquitärer und bestmöglicher Prävention und Therapie gerecht zu werden.

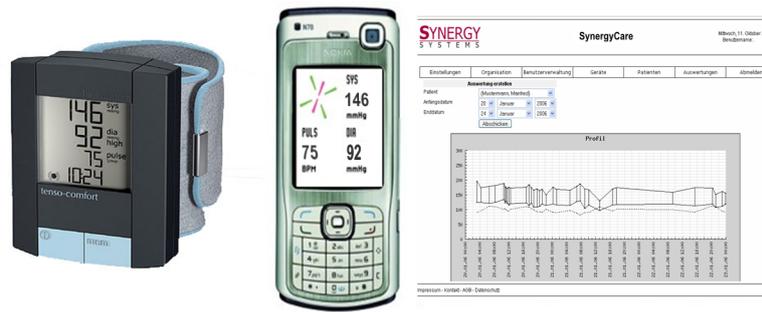


Abb. 1.4: Telemedizinisches Blutdruckmesssystem des Heinz Nixdorf-Lehrstuhls für Medizinische Elektronik, realisiert von der Sensor GmbH.

Gerade bei Krankheiten, mit höchst individuellen Ursachen und Ausprägungen, ist es unerlässlich, möglichst authentische Parameter zu erfassen, die sowohl den aktuellen Zustand im Alltag des Patienten wiedergeben als auch den Krankheitsverlauf über einen längeren Zeitraum dokumentieren. Das bedeutet, der Patient führt seine Messungen selbständig und in einer für ihn gewohnten Umgebung durch. Dies kann zu Hause, am Arbeitsplatz und auf Reisen oder an jedem anderen beliebigen Ort geschehen, wobei immer ein aktueller und individueller Vitalparameter aufgezeichnet wird. Ein weiterer Vorteil neben dieser Ortsunabhängigkeit ist die freie Wahl des Messzeitpunktes. Je nach Indikation kann der Patient die Messungen zu selbst gewählten oder vom medizinischen Fachpersonal vorgegebenen Zeitpunkten vornehmen.

Durch die automatische Übertragung der Messwerte an eine Datenbank ist deren lückenlose Aufzeichnung sichergestellt. Diese ist für eine individuelle und personalisierte Therapie unerlässlich. Dabei können neben dem reinen Verlauf der Messwerte, die alleine schon die Verbesserung oder Verschlechterung des Gesundheitszustandes dokumentieren, hochgradig individuelle Gegebenheiten aufgedeckt werden. Die Festlegung patientenspezifischer Grenzwerte ermöglicht ein Alarmmanagement, bei deren Über- oder Unterschreitung definierbare Aktionen wie ein Anruf oder eine Benachrichtigung von Patient und/oder Arzt erfolgen.

Mit solch einem Virtual Lab, siehe Abbildung 1.5, ist es möglich authentische Datenmuster in personalisierter Umgebung der Probanden zu erheben und damit erstmals einen unmittelbaren wirklichkeitsgetreuen Eindruck von beliebigen Interventionsstrukturen zu erhalten. Durch die bidirektionale Übertragungsstrecke sind Rückmeldungen und Interventionen mittels Sprach- wie auch Datenkommunikation in Form von Text, Bild und Ton zwischen Arzt und Patient oder umgekehrt möglich.

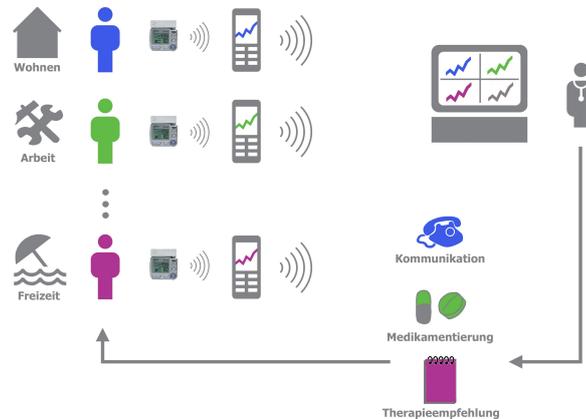


Abb. 1.5: Das Virtual Lab - ein virtuelles telemedizinisches Labor

Da das System verschiedenste physiologische Daten erheben und transportieren kann, steht es für die Entwicklung diverser physikalischer Biofeedback-Therapien zur Verfügung. So ist es z.B. für die klinische Forschung interessant Einnahmezeitpunkt und Reaktionsantwort von Medikamenten in authentischer Umgebung zu überprüfen. Die mit dieser elektronischen Assistenz gewonnenen Daten liefern wichtige Erkenntnisse bei der Einführung neuer Präparate. Auch nicht-medikamentöse Therapien, wie z. B. akustisches Biofeedback, können ebenso wie zirkadiane oder genderspezifische Einflüsse auf den Blutdruck- bzw. den Therapieverlauf untersucht werden.

Die Aufgabenstellung

Der Nachweis, dass die virtuelle Laborumgebung eine ideale Entwicklungs- und Erprobungsplattform für personalisierte Therapien darstellt, ist die Hauptaufgabe dieser Arbeit. Die dafür vorgesehene Anwendung ist eine neu zu entwickelnde akustische Biofeedback-Therapie, denn es ist seit langem bekannt, dass akustische Signale metabolische und zentralnervöse Funktionen modulieren und Klänge bestimmte physiologische Wirkungen beim Menschen hervorrufen können [142]. Ein oft beschriebener Effekt ist die blutdrucksenkende Wirkung von speziellen Musikstücken und iterativen Klangmustern. Aufgrund des hohen Verbreitungsgrades von Bluthochdruck bzw. der essentiellen Hypertonie, den damit verbundenen Risiken und den multifaktoriellen Ursachen, wird das neue Therapiekonzept exemplarisch auf die essentielle Hypertonie ausgerichtet sein. Da bei der häufig auftretenden stressinduzierten Hypertonie grundsätzlich

Entspannungsverfahren sowie Änderungen im Lebensstil von Bedeutung sind, bietet sich ein Interventionsverfahren basierend auf Feedback und akustischen Interventionen an. Unterstützend kommt hinzu, dass die Blutdruckselbstmessung durch die Patienten sehr einfach durchzuführen und aus medizinischer Sicht akzeptiert ist. Dass die selbst gemessenen Blutdruckwerte besser mit dem aktuellen Gesundheitszustand korrelieren als die im ärztlichen Umfeld gemessenen und somit bessere, gesichere und authentischere Werte liefern, wurde bereits in vielen Studien nachgewiesen [134].

Die Herausforderung dieser Arbeit war *die Entwicklung einer telemedizinisch gestützten akustischen Biofeedbacktherapie als Regulativ bei primärer Hypertonie*. Im Rahmen dessen wird die Wirkungsweise verschiedener Klangmuster, sowie deren Eignung für systemische Interventionen untersucht. Mit dem virtuellen telemedizinisch gestützten Labor sollen aktuelle Fragestellungen aus der medizinischen Praxis geklärt werden.

Folgende Teilaufgaben gilt es zu lösen:

- Realisierung des technischen Gesamtsystems, also des *Virtual Lab*
- Auswahl der geeigneten Sensorik und Datenübertragungsverfahren
- Realisierung einer Datenbank inkl. Geräteanbindung
- Bestimmung akustischer Interventionssequenzen
- Generierung und Übermittlung von Feedback und Intervention
- Evaluierung der Technik und Prozesse
- Evaluierung der akustischen Biofeedback-Therapie sowie deren medizinische Wirkungsweise.

Dabei sind folgende spezifische Fragestellungen zu klären:

- Darstellung der Reizwirkungskette von Klangmustern
- Wie beeinflussen Klänge die Blutdruckregulation?
- Welches sind die musikalischen Wirkbestandteile analog den pharmazeutischen Wirkstoffen?

- Skelettierung der blutdrucksenkenden Marker
- Generierung überoptimaler Interventionssequenzen

Ziel der Arbeit ist die:

1. Realisierung eines sensorgestützten, personalisierten und individualisierten Assistenzsystems
2. Abbildung einfacher und automatisierter Prozesse
3. Ermittlung der Möglichkeiten und Grenzen des *Virtual Lab*

Daraus ergibt sich die folgende Vorgehensweise und Struktur dieser Arbeit, wie in Abbildung 1.6 veranschaulicht.

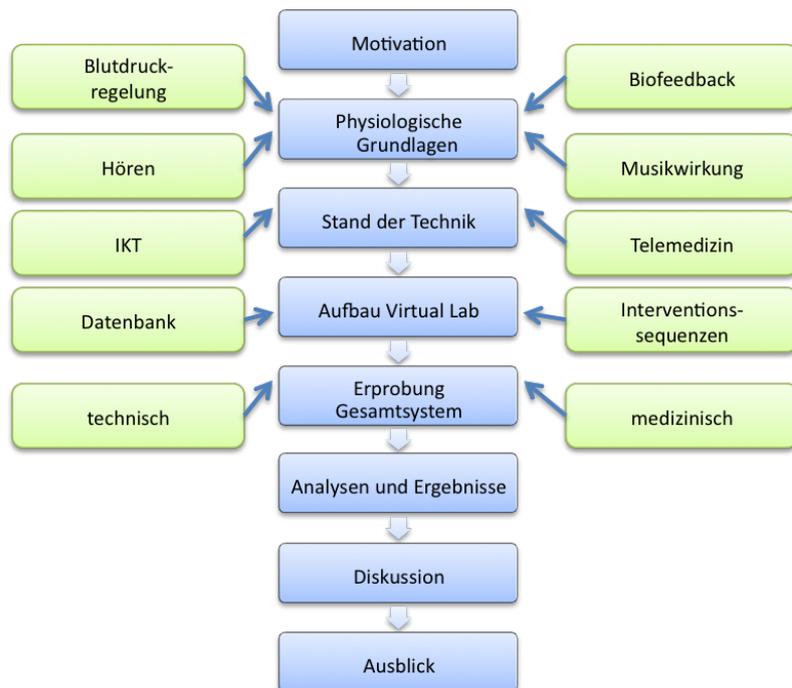


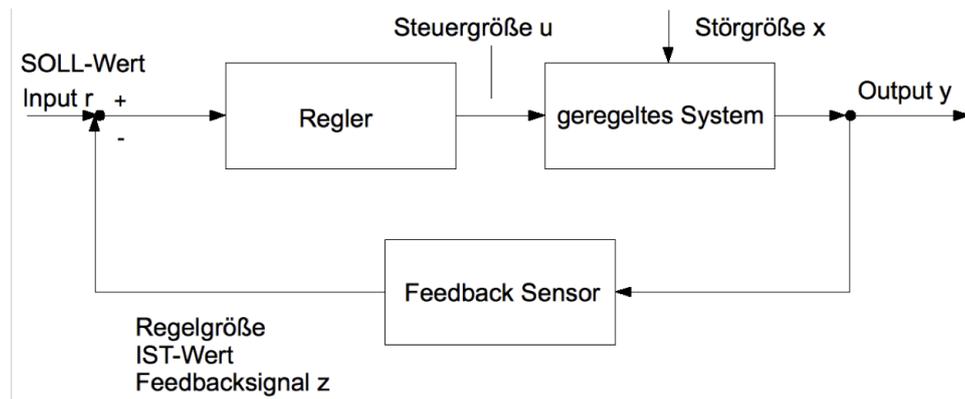
Abb. 1.6: Der Aufbau und die Struktur der Arbeit

2 Feedback und biologische Regelsysteme

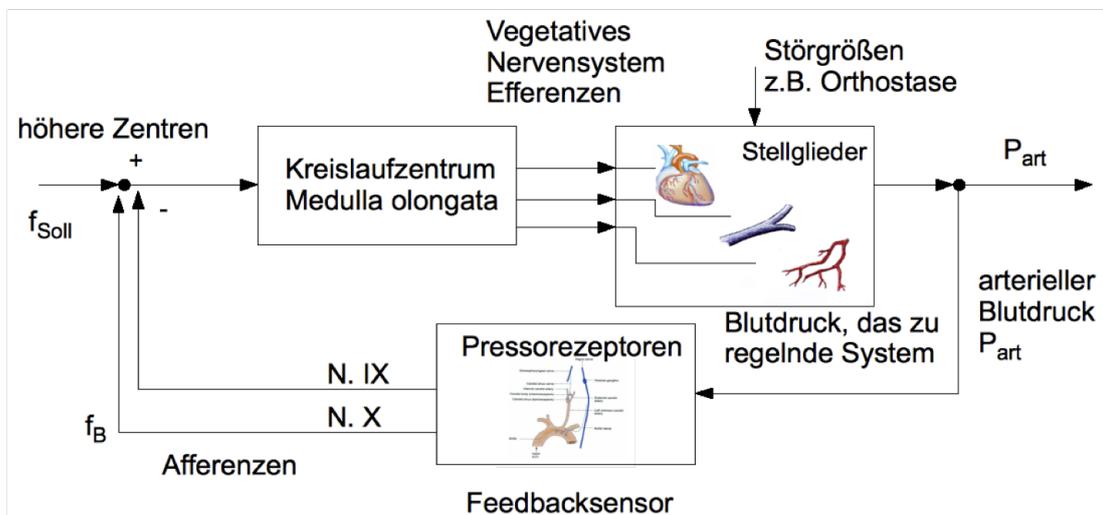
Lebendige Systeme sind geregelte Systeme. Bereits die ersten, noch kernlosen Lebewesen zeigen ausgeprägte Regelstrecken (bspw. Lac operon von e-coli [140]) In der Mitte des vergangenen Jahrhunderts waren die damit zusammenhängenden Fragen Gegenstand ausführlicher Forschungsarbeiten [38, 201, 40, 80]. Regelung kann auf molekularem Niveau, zellulärer und systemischer Ebene stattfinden. Beispiele hierfür sind die Blutzuckerregelung, die Blutdruckregelung oder die Lageregelung. Diabetes und Hypertonie stellen zwei Beispiele für Regulationsstörungen dar, die medizinisch von großer Bedeutung sind und volkswirtschaftlich einen bedeutenden Stellenwert besitzen. Geregelte Systeme können über Regeldiagramme veranschaulicht und beschrieben werden. Die Regelstrecken werden durch entsprechende Sensoren, Regler und Aktoren bestimmt und stellen i. Allg. einen Sollwert–Istwert–Abgleich dar. Die folgende Abbildung 2.1 stellt dieses Prinzip dar.

Wie am Beispiel Diabetes und Hypertonie bekannt, können Regeldefekte durch medikamentöse Behandlung ausgeglichen werden.

Bei Diabetes wird die zu geringe Insulinproduktion durch die Gabe von Insulin kompensiert. Die Hypertonie als systemischer Regelungsdefekt, kann ebenfalls medikamentös beeinflusst werden. Hier hat sich allerdings in den vergangenen Jahren gezeigt, dass neben der Gabe eines an den Gefäßwänden angreifenden Wirkstoffes auch zentralnervös wirkende Substanzen mit Erfolg eingesetzt werden können. Auch für Diabetes mellitus ist bekannt, dass zentralnervöse Erregungsmuster die Insulinproduktion beeinflussen können (wie z.B. Stress) [100]. Solche Phänomene sind auch aus anderen Krankheitsfeldern bekannt, weshalb schon im Altertum versucht wurde, Krankheiten mit Strategien zu behandeln, die ursächlich an zentralnervösen Reglern ansetzen.



(a) Prinzipielles technisches Regelkreisschema eines Closed Loop Systems, d.h. eines geschlossenen selbstregulierenden Systems [100].



(b) Die Blutdruckregulation dargestellt als biologischer Regelkreis mit negativer Rückkopplung, die allen kybernetischen Systemen gemeinsam ist. Grafik modifiziert nach [177] und [49].

Abb. 2.1: Technisches und biologisches Regelkreisschema

Gerade am Beispiel der Diabetes wird seit vielen Jahren versucht, durch implantierbare elektronische Systeme die Regelungsdefizite auszugleichen. Während die Elektronik und die Aktorik schon seit langem zur Verfügung stehen, scheitert das Verfahren an der mangelnden Verfügbarkeit implantierbarer Sensoren für Glucose, die über eine entsprechende Langzeitstabilität verfügen, woran der Heinz Nixdorf-Lehrstuhl für Medizinische Elektronik in einem anderen Projekt arbeitet [26].

Für den Fall der Regulation des systemischen Blutdruckes sind dagegen in den vergangenen Jahren erfolgreich verschiedene Ansätze empirisch entwickelt worden, wie unter Verwendung akustischer Signale der Blutdruck moduliert werden kann [182, 35, 120]. Die Ergebnisse sind allerdings widersprüchlich und die dahinter liegenden Regelstrecken weitestgehend unbekannt.

Sämtliche Steuer- und Regelungsvorgänge zur Homöostase des Menschen sind eng vernetzt, äußerst komplex und darüberhinaus auch adaptiv. Dies bedeutet, dass die Sollgrößen der Organe oder jeweiligen Subsysteme sich situativ und alternierend den äußeren Umständen anpassen und somit nicht nur allein durch Feedback regelbar sind [177]. Aus diesem Grund ist die Darstellung der Blutdruckregulation in Abbildung 2.1(b) auch nicht vollständig. Sie zeigt nur den neuronalen Teil der Steuerung. An der Einstellung eines optimalen Blutdruckes sind weitere Mechanismen wie die lokale und hormonelle Steuerung beteiligt. Deren vollständige Erläuterung, sowie weitere für den Gesamtzusammenhang wichtige physiologische und medizinische Grundlagen, werden im Folgenden ausgeführt.

2.1 Feedback Therapie versus Medikation

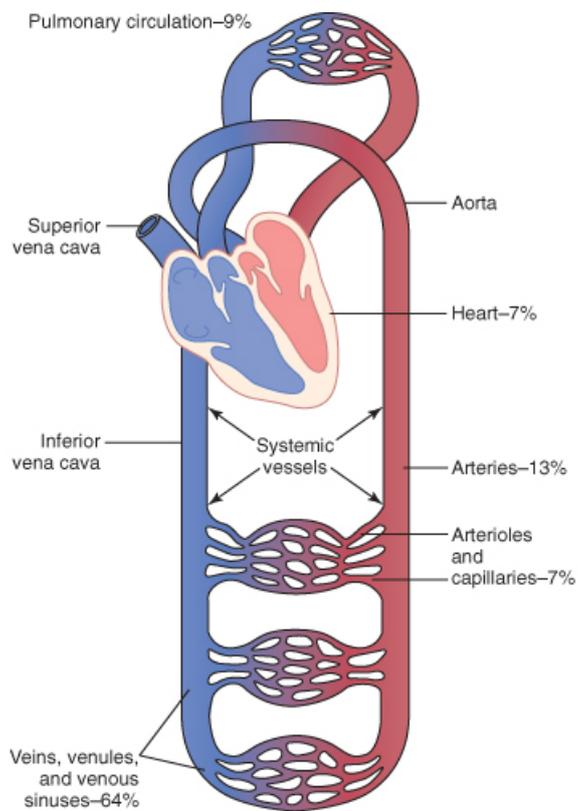
2.1.1 Symptomatik der Blutdruckregulation

Das Herz-Kreislauf-System ist ein geschlossener Kreislauf und im kybernetischen Sinne ein Closed-Loop-System mit negativer Rückkopplung. Das gesamte kardiovaskuläre System wird vom Herz als zentraler Motor und Pumpe angetrieben und teilt sich in zwei Kreisläufe, den großen bzw. systemischen Kreislauf und den pulmonalen oder Lungen-Kreislauf auf, siehe Abbildung 2.2. Das Herz pumpt mit der linken Kammer das frisch mit Sauerstoff angereicherte Blut über die Aorta in die arteriellen Blutgefäße. Von dort strömt es im Hochdrucksystem durch die Arterien, Arteriolen in die

Kapillaren der Körperperipherie. An den Kapillaren und den postkapillären Venolen findet der Stoff- und Flüssigkeitsaustausch statt, wodurch die lebensnotwendige Ver- und Entsorgung der Zellen sämtlicher Organe erfolgt. Nach den Austauschvorgängen am Endothel der Gefäße beginnt der venöse Rückstrom im Niederdrucksystem über die Venolen, Venen in die Venae cavae und endet mit dem Einströmen in den rechten Vorhof des Herzens. Das venöse Gefäßsystem dient aufgrund seiner hohen Dehnbarkeit und Speicherkapazität als Blutreservoir und steht für Regulationsvorgänge durch Konstriktion der Venen zur Verfügung. Der gesamte Zyklus dauert etwa 1 Minute.

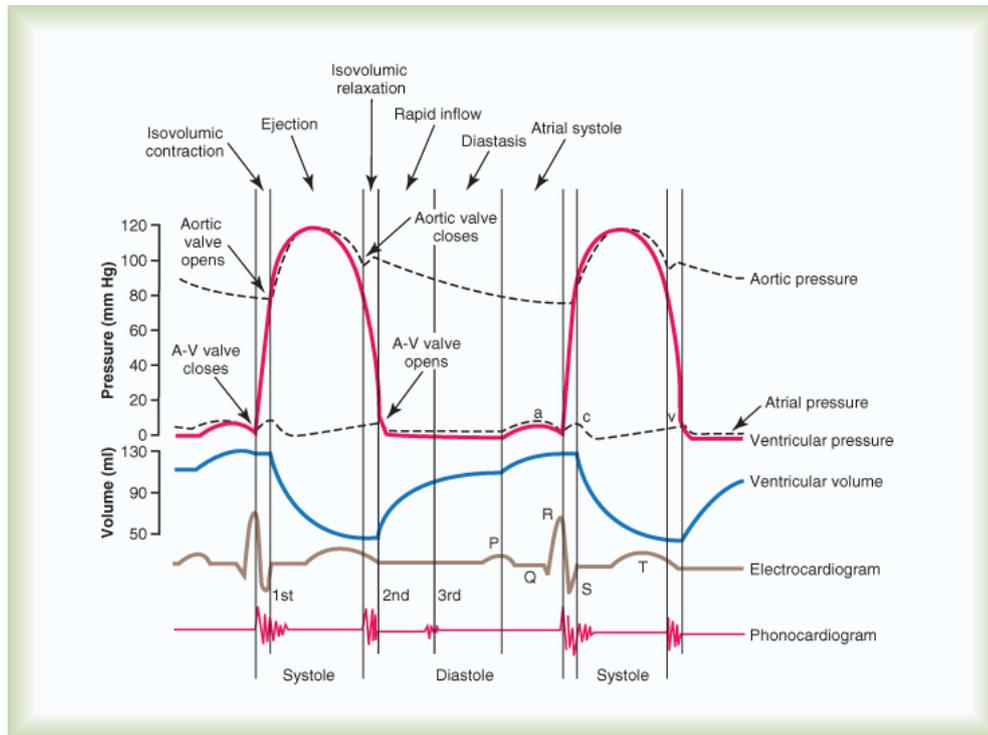
Das Herz ist in zwei Hälften bzw. in vier Hohlräume, das linke und rechte Atrium (Vorhof) sowie das linke und rechte Ventrikel (Kammer), geteilt. Atrium und Ventrikel sind über Herzklappen miteinander verbunden, die auch die Strömungsrichtung des Blutes, von den Vorhöfen in die Kammern sodann von diesen in die Aorta bzw. Pulmonalarterie, bestimmen. Dieser Pumpvorgang bildet den Herzzyklus und wird in vier Aktionsphasen der Ventrikel durchlaufen. Dies sind die Anspannungs- und Auswurfphase der Systole und die Entspannungs- und Füllungsphase der Diastole. An deren Ende kontrahieren die Vorhöfe. Vor diesen mechanischen Aktionen erfolgt die elektrische Erregung der Vorhöfe und Kammern [177]. Eine normale Herzfrequenz beträgt in Ruhe ca. 60 bis 80 Schläge pro Minute, der beschriebene Herzzyklus wird somit in etwa einer Sekunde durchlaufen. Diese Phasen der Herzaktionen werden in einem Elektrokardiogramm (EKG) durch den typischen P-QRS-T Kurvenverlauf charakterisiert, siehe Abbildung 2.3 und 2.4.

Das *Schlagvolumen* des Herzens ist das durch die Kontraktion des linken Ventrikels während der systolischen Phase in die Aorta ausgeworfene Blutvolumen und beträgt im Mittel ca. 80 ml. Es setzt sich aus der Differenz des im linken Ventrikel vorherrschenden enddiastolischen Volumens (in Ruhe ca. 120 ml) zu dem am Ende der Systole in der linken Kammer noch vorhandenen Restvolumen, dem endsystolischen Volumen (ca. 40 ml), zusammen. Das *Herzzeitvolumen* kennzeichnet im Wesentlichen die Arbeitsleistung des Herzens. Es ist das Produkt aus dem Schlagvolumen mit der Schlagfrequenz. Die Sicherstellung einer effektiven Pumpfunktion des Herzens setzt die zeitliche und räumliche Ablaufkoordination der elektrischen Erregung, der mechanischen Kontraktion sowie die Erschlaffung aller vier Hohlräume voraus. Die Abstimmung dieses Systems erfolgt durch den autonomen Herzmuskel selbst, d.h. die Reizbildung geschieht direkt im Organ und wird durch ein komplexes Erregungsleitungssystem koordiniert. Zentraler Schrittmacher des Herzens ist der *Sinusknoten* im rechten Atrium. Dessen Er-



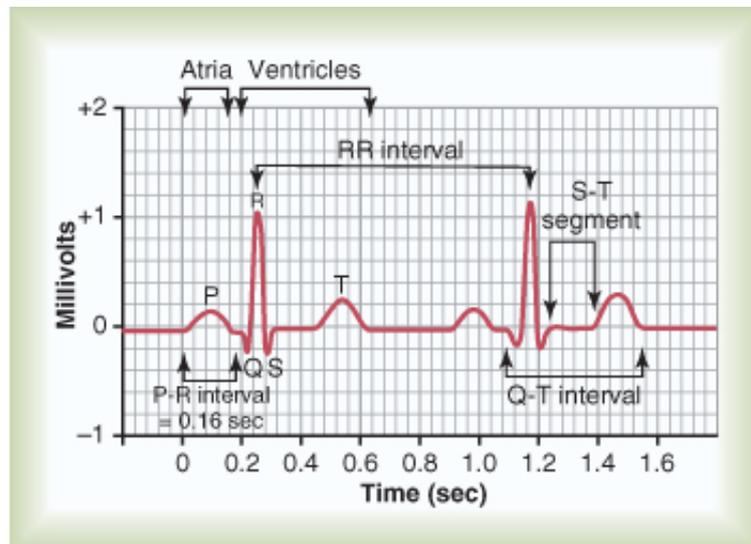
© Elsevier. Guyton & Hall: Textbook of Medical Physiology 11e - www.studentconsult.com

Abb. 2.2: Das Herz-Kreislauf-System, entnommen aus [79]



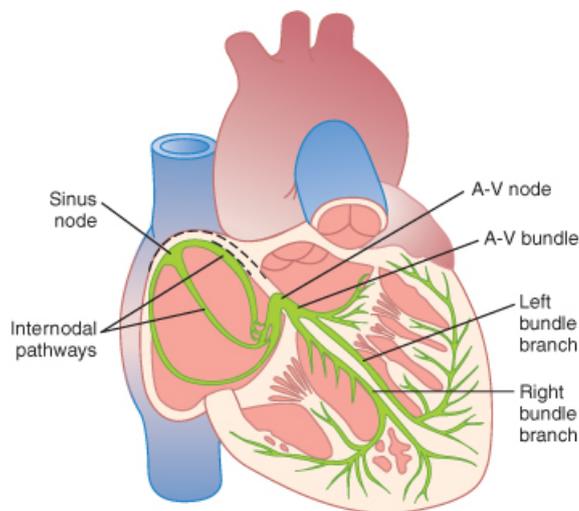
© Elsevier. Guyton & Hall: Textbook of Medical Physiology 11e - www.studentconsult.com

Abb. 2.3: Die vier Aktionsphasen des Herzens, entnommen aus [79]



© Elsevier. Guyton & Hall: Textbook of Medical Physiology 11e - www.studentconsult.com

Abb. 2.4: Die typische EKG-Kurve, entnommen aus [79]



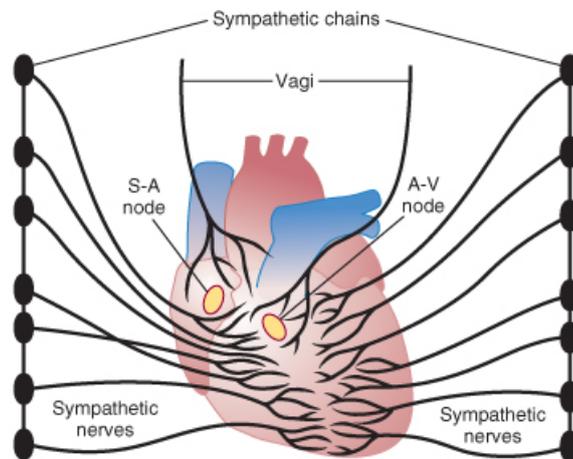
© Elsevier. Guyton & Hall: Textbook of Medical Physiology 11e - www.studentconsult.com

Abb. 2.5: Das Erregungsleitungssystem des Herzens mit der Lage der Triggerpunkte, entnommen aus [79]

regung breitet sich über die beiden Vorhöfe zum *Atrioventrikularknoten (AV-Knoten)* aus und gelangt dann über das *His-Bündel* mit seinen beiden Tawara-Schenkeln zu den *Purkinje-Fasern*. Diese übertragen die Erregung auf das Kammermyokard von innen nach außen und von der Spitze zur Basis. Abbildung 2.5 zeigt die Lage der beteiligten Punkte. Die Impulsfrequenz des Sinusknotens bestimmt die Schlagfrequenz des Herzens, da jedes Aktionspotential im Sinusknoten normalerweise einen Herzschlag auslöst. Sollte die Weiterleitung der Erregung gestört sein, übernehmen die nachliegenden Teile die Schrittmacherfunktion. Das Herz schlägt dann in deren langsamerer Eigenfrequenz, die beim AV-Rhythmus ca. 40-55/min beträgt, unter Umständen mit der Frequenz der tertiären ventrikulären Schrittmacher von 25-40/min [177].

Trotz der Autonomie des Herzens muss die Herztätigkeit sich immer dem durch individuelle Gegebenheiten verursachten wechselnden Bedarf anpassen. Dafür stehen verschiedene Modulationsmöglichkeiten zur Verfügung, jedoch vor allem die efferenten Herznerven. Folgende Qualitäten können neural beeinflusst werden:

- die **Chronotropie**, d.h. die Impulsbildungsfrequenz des Schrittmachers und somit die Schlagfrequenz des Herzens
- die **Dromotropie**, d.h. die Geschwindigkeit der Erregungsleitung vor allem im AV-Knoten



© Elsevier. Guyton & Hall: Textbook of Medical Physiology 11e - www.studentconsult.com

Abb. 2.6: Die Innervation des Herzens mit sympathischen und parasympathischen Fasern, entnommen aus [79]

- die **Inotropie**, d.h. die Kontraktilität des Herzens

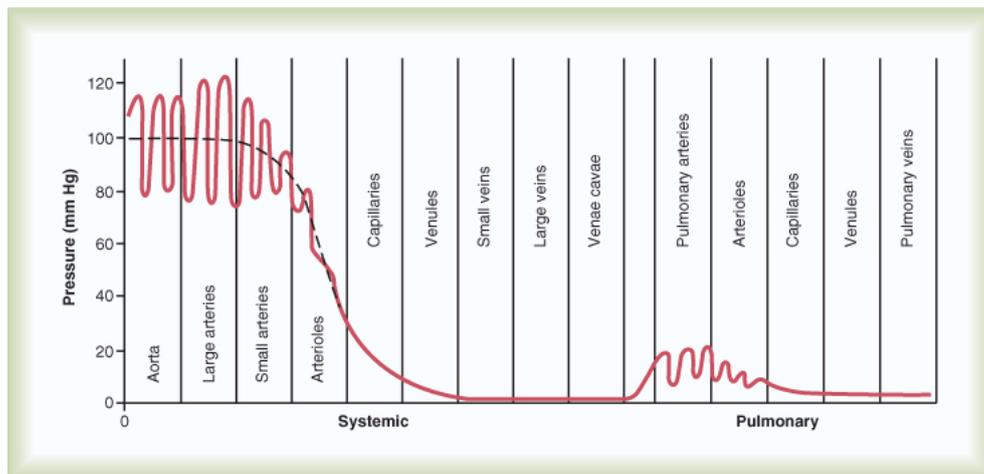
Die intrinsischen und extrinsischen Modulationsverfahren werden zusammen mit den Kreislaufregulationsmechanismen im nächsten Abschnitt auf Seite 25 erläutert.

Arterieller Blutdruck

Wird im allgemeinen vom Blutdruck gesprochen, ist immer der arterielle Blutdruck gemeint. Darunter ist der Blutdruck im Körperkreislauf, also dem systemischen Kreislauf, zu verstehen und wird deshalb auch als systemischer Blutdruck bezeichnet. Aufgrund der pulsatilen Herzarbeit schwankt der Aortendruck zwischen einem Maximum, dem **systolischen Druck**, das während der systolischen Auswurfphase erreicht wird und einem Minimum, dem **diastolischen Druck**, in der systolischen Anspannungsphase. Idealerweise betragen der systolische Blutdruck 120 mmHg und der diastolische Blutdruck 80 mmHg.

Die Differenz der beiden Extremwerte ist die *Blutdruckamplitude* und eine Funktion des Schlagvolumens und des *totalen peripheren Widerstands* (TPR , R_{tot}). Der totale periphere Widerstand hängt wiederum von der Compliance (Volumendehnbarkeit) der Arterien ab.

$$\Delta p_{art} = HZV \times TPR = SV \times f_S \times R_{tot} \quad (2.1)$$



© Elsevier. Guyton & Hall: Textbook of Medical Physiology 11e - www.studentconsult.com

Abb. 2.7: Normaler Blutdruckverlauf in den verschiedenen Partitionen des Kreislaufsystems, entnommen aus [79]

Entscheidend für die periphere Durchblutung ist jedoch der *mittlere Blutdruck*, der von ca. 100 mmHg in der Aorta auf ca. 2-4 mmHg in der Venae cavae abfällt und somit eine sehr hohe arteriovenöse Druckdifferenz aufweist, siehe Abbildung 2.7. Der mittlere Blutdruck ist der über die Zeit eines Herzzyklus gemittelte Blutdruck.

Aus dem Zusammenhang in Gleichung (2.1) sind die beiden wichtigsten Stellglieder der Blutdruckregulation erkennbar. Zum einen sind das die Modifikation der Herzleistung durch die Modulation des Schlagvolumens oder der Schlagfrequenz. Zum anderen die Erhöhung oder Erniedrigung des totalen peripheren Widerstands mittels Konstriktion oder Dilatation der Blutgefäße und einer damit einhergehenden Variation der Blutmenge in den Gefäßen, wie in Abbildung 2.1b) auf Seite 13 bereits dargestellt.

2.1.1.1 Physiologie der Blutdruckregelung

Der Blutdruck ist ein essentieller systemischer Parameter zur Beurteilung des Einstellungs- und Stabilitätsgrades des Kreislaufes und damit mittelbar der Organ- und Körperfunktionen. Die Regulation des Kreislaufs und des Blutdrucks wird von einem komplexen System mehrerer eng vernetzter und voneinander abhängiger natürlicher Mechanismen bestimmt. Es stehen diverse Stellglieder sowie Stellgrößen zur Verfügung. Die zentrale Steuerung und Koordination erfolgt in den Kreislaufzentren der Medulla Oblongata im verlängerten Mark und höheren Zentren wie dem Hypothalamus.

Die Hauptaufgabe der Kreislaufregulation besteht darin, auch unter wechselnden Umgebungs- und Belastungsbedingungen, die Blutversorgung zu gewährleisten. Zu den übergeordneten Prinzipien gehört die Sicherstellung [80, 177]:

- einer optimalen Regelung der Herzaktion und des Blutdruckes
- einer Mindestdurchblutung aller Organe
- die Umverteilung des Blutstroms zu aktiven Organsystemen auf Kosten ruhender Organe
- die Selbstregulierung des Blutdrucks aufgrund der unterschiedlichen körperlichen Bedürfnisse
- eines Blutdrucks, der keine Selbstschädigung zur Folge hat

Die Kreislaufregulation muss schnell und zuverlässig auf verschiedenste innere und äußere Störungen reagieren. Zur Erreichung dieser Ziele existieren Mechanismen der Kurzzeitregelung für die sofortige Intervention und der Langfristregelung für eine dauerhafte Stabilisierung. Eine langfristige Einstellung des Blutdruckes ist nur über die Justierung des Blutvolumens möglich. Diese wird primär von den Nieren und den dazugehörigen Steuerprozessen übernommen. Die Kurzzeitregelung des Blutdrucks ist notwendig, um in akuten Stresssituationen oder bei unvorhergesehenen Ereignissen wie beispielsweise Hypovolämie (Volumenmangel), hämorrhagischer Schock (starker Blutverlust), kardiogener Schock (Herzversagen) oder anaphylaktischer Schock (Allergie) den arteriellen Blutdruck zu normalisieren. Sie wird im Wesentlichen durch neuronale Prozesse der sympathischen und parasympathischen Afferenzen und Efferenzen bestimmt.

Die periphere Kreislaufregulation

Die Steuerung der Organdurchblutung erfolgt in erster Linie durch die Gefäßweite. Der lokale Gefäßtonus kann durch

- lokale Einwirkungen
- hormonelle Signale
- neuronale Signale

beeinflusst werden [177].

Die **lokale Kreislaufsteuerung (Autoregulation)** hat zwei Hauptfunktionen. Zum einen muss die Organdurchblutung bei wechselndem Blutdruck konstant gehalten werden und zum anderen erfolgt eine Anpassung der Durchblutung in Abhängigkeit der Stoffwechselaktivität eines Organs (*metabolische Autoregulation*). Ein möglicher Autoregulationsmechanismus ist die *myogene Reaktion* (Kontraktion der Gefäßmuskulatur) auf eine blutdruckbedingte Wanddehnung der Blutgefäße. Ein Sauerstoffmangel dagegen wirkt im Allgemeinen gefäßerweiternd außer in der Lunge. Eine erhöhte lokale Konzentration verschiedener Stoffwechselprodukte führt zu einer *lokal-metabolisch* verursachten Vasodilatation vor allem der präkapillären Arteriolen. Die Folge ist eine gesteigerte Durchblutung mit verbesserter Nährstoff- und Sauerstoffversorgung sowie einem schnelleren Abtransport von diesen Stoffwechselprodukten. Des Weiteren sind an der Autoregulation auch gefäßerweiternde Substanzen wie z.B. Prostaglandine beteiligt.

Die **hormonale Kreislaufsteuerung** wird durch entweder direkt an der Gefäßmuskulatur wirkende gefäßaktive Hormone (z. B. Adrenalin) oder durch sie lokal freigesetzte gefäßaktive Substanzen (z. B. NO, Endothelin) umgesetzt. Das vom Nebennierenmark produzierte und in das Blut ausgeschüttete Adrenalin beeinflusst ebenfalls die Durchblutung. In niedriger Dosierung wirkt es über β_2 -Adrenozeptoren vasodilatatorisch und in hoher Konzentration über α_1 -Adrenozeptoren vasokonstriktorisch an den Gefäßen. Histamin beispielsweise hat eine dilatierende und Angiotensin II eine konstringierende Wirkung auf die Gefäßmuskulatur.

Die **neuronale Kreislaufsteuerung**, d.h. die neuronale Kontrolle der Durchblutung setzt überwiegend an den kleinen Arterien und größeren Arteriolen an bzw. an den Venen für den venösen Rückstrom zum Herzen. Die Regulation wird durch die Änderung des *Sympathikotonus* initiiert. Eine Anregung des Sympathikus durch das Kreislaufzentrum führt zur Vasokonstriktion dadurch, dass Noradrenalin als postganglionärer Transmitter an den α_1 -Adrenozeptoren bindet. Die Verringerung des Sympathikotonus bewirkt die Vasodilatation. Die neuronale Regulation wird über eine *zentrale Mitinnervation* koordiniert, bei der die Hirnrinde z.B. bei Muskelaktivität auch entsprechende Impulse zu den Kreislaufzentren sendet oder durch ein neuronales Feedback bei einer Änderung des Stoffwechselzustandes in einem Organ.

Ein weiteres maßgebliches System zur Blutdruckregulation ist das **Renin-Angiotensin-System (RAS)**. Zu niedriger Blutdruck in den Nieren führt zu der Produktion von *Renin* in speziellen renalen Zellen und startet damit eine Kettenreaktion. Renin bewirkt die Erzeugung von *Angiotensin I* über Angiotensinogen (aus der Leber). Mittels des Angiotensin-Converting-Enzyms (ACE) entsteht *Angiotensin II*. Angiotensin II wirkt sehr stark vasokonstriktorisch und somit blutdrucksteigernd. Gleichzeitig stimuliert es in der Nebennierenrinde die Synthese von *Aldosteron*. Letzteres führt zu einer Retention von Natrium Na^+ in den Nieren. Damit erhöht sich der osmotische Druck der intravaskulären Flüssigkeit und führt somit zu einem erhöhten intravaskulären Blutvolumen. Die Reninproduktion wird durch von den Vorhof-Myozyten erzeugtes Atriopeptin (ANP), als Antwort auf einen zu hohen Fülldruck, gehemmt, was eine erhöhte Natriumexkretion zur Folge hat. Das Zusammenspiel zwischen dem Renin-Angiotensin-System mit Atriopeptin spielt eine wichtige Rolle bei der Flüssigkeitsregulation im Körper.

Die Regelung der Herzleistung

Neuronale und hormonelle Steuerung der Herzfrequenz¹

Der Herzmuskel ist, wie bereits erwähnt, von den beiden Gegenspielern des autonomen Nervensystems *Sympathikus* und *Parasympathikus* innerviert. Die Anpassung der Herzfrequenz ist bekannt als chronotroper Effekt. Eine Erregung der sympathischen Nerven erhöht die Herzfrequenz (*positive Chronotropie*) wohingegen die Stimulation des Parasympathikus die Herzrate verlangsamt (*negative Chronotropie*).

Der Nervus Vagus wird an dem Ganglion kurz vor dem Herz synaptisch auf kurze postganglionäre parasympathische Fasern umgewandelt, welche an den Schrittmacherzellen (Sinusknoten) und an dem AV-Knoten enden, siehe Abbildung 2.6 und 2.8. Da die synaptische Übertragung hier cholinerg ist, wird der Überträgerstoff Acetylcholin (ACh) freigesetzt, welches die Herzfrequenz senkt sowie über den linken Vagus-Ast die Erregungsleitung zum AV-Knoten verlangsamt (*negative Dromotropie*). Acetylcholin erhöht die Permeabilität der Knotenzellen für Kalium-Ionen. Das hat zwei Effekte, zum einen verringert es die Steigung des Schrittmacherpotentials und zum anderen hyperpolarisiert es das Membranpotential. Dadurch wird die Zeit bis zur Erreichung

¹ Herzfrequenz, Schlagfrequenz und Herzrate werden synonym verwendet

der Schwelle des Schrittmacherpotentials größer, so dass das Intervall der aufeinanderfolgenden Aktionspotentiale länger wird und die Schlagfrequenz sinkt [159].

Präganglionäre sympathische Fasern verlaufen zum Herzen über die spinalen Segmente $Th_1 - Th_6$ bis zu den Ganglien im thorakalen sympathischen Grenzstrang. Von dort laufen lange postganglionäre Fasern zum Herzen, siehe Abbildung 2.8 auf Seite 24. Die präganglionäre Übertragung ist cholinerg mit dem Überträgerstoff Acetylcholin und die postganglionäre Übertragung erfolgt adrenerg mittels dem Überträgerstoff Noradrenalin. Noradrenalin sowie Adrenalin aus dem Plasma binden an die β_1 -Adrenozeptoren des Herzens und bewirken eine Steigerung der Schlagfrequenz am Sinusknoten (*positiv chronotrope Wirkung*) bzw. eine beschleunigte Reizüberleitung im AV-Knoten (*positiv dromotrope Wirkung*).

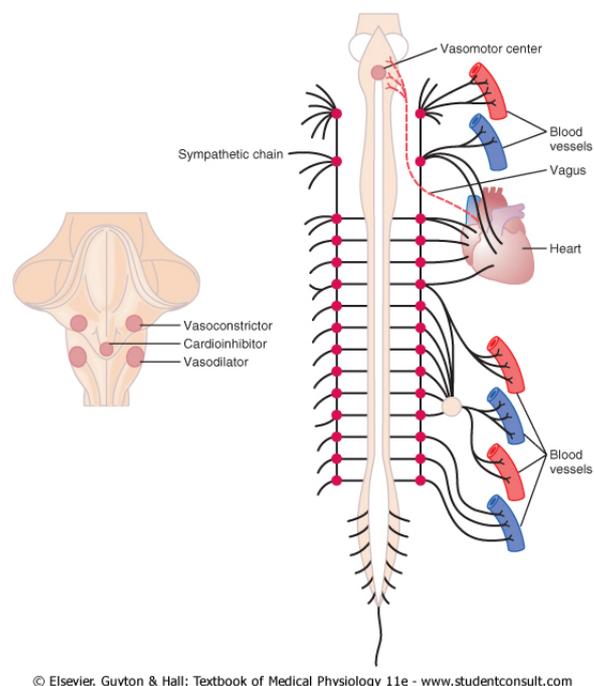


Abb. 2.8: Die sympathische und parasympathische Versorgung des Herzens, entnommen aus [79]

Regulation des Herzschlagvolumens

Das Schlagvolumen wird durch zwei verschiedene Mechanismen reguliert:

1. durch die *intrinsische Steuerung* der Kontraktilität des Herzens, d.h. die Kraft der Herzmuskelzuckung bei gegebener Vordehnung des Myokards am Ende der Diastole.
2. durch die *extrinsische Steuerung*, welche durch das autonome Nervensystem und die zirkulierenden Hormone bestimmt wird.

Die intrinsische Steuerung des Schlagvolumens erfolgt durch den **Frank-Starling-Mechanismus**. Er sorgt für die Balance der Schlagvolumina im linken und rechten Ventrikel. Bei erhöhter *Vorlast* (Ventrikelfüllung) führt dies zu einer Steigerung des Schlagvolumens und der Herzarbeit. Erhöhte *Nachlast* (Aortendruck) steigert die Herzarbeit bei letztendlich normalisiertem Schlagvolumen. Weitere Einflüsse auf das Herzzeitvolumen besitzen der *venöse Rückstrom* und der primär vom Blutvolumen abhängige *zentrale Venendruck*. Letzterer wird von mehreren Faktoren wie der Schwerkraft, der Atmung, dem peripheren Venentonus, der Muskelpumpe und dem Blutvolumen determiniert.

Extrinsische Faktoren führen zu einer von Vor- und Nachlast unabhängigen Veränderung der Herzkraft, welche als veränderte Inotropie oder Kontraktilität bezeichnet wird [177]. Diese nimmt durch eine Steigerung der Herzfrequenz mittels sympathischer Erregung sowie durch Adrenalin und Noradrenalin zu. Dies geschieht über deren Bindung an den β_1 -Adrenozeptoren und hat eine *positiv-inotrope* Wirkung. Dadurch wird auch die Kontraktionsgeschwindigkeit des Myokards beeinflusst. *Negativ-inotrope* Mittel sind Substanzen, die die Kraft reduziert, mit der das Herz kontrahiert. Dazu gehören als Antagonisten zu den β_1 -Adrenozeptoren Propranolol, Kalzium-Kanal-Blocker, Bariturat oder Halothan [159]. Frequenzinotropie kann über diesen Mechanismus auch der Parasympathikus, allerdings nur indirekt, herbeiführen.

Die zentrale Kreislaufregulation

Die Regelung des lokalen Gefäßtonus und der Herzaktivität erfolgt über das autonome Nervensystem, welches wiederum vom zentralen Nervensystem (ZNS) kontrolliert wird. Die zentrale Kreislaufsteuerung übernehmen in erster Linie ZNS-Bereiche, die sogenannten Kreislauf-Zentren in der *Medulla oblongata* (verlängertes Mark) und im *Pons*.

Die übergeordnete Steuerung und Koordination erfolgt durch den *Hypothalamus* [171], siehe Abbildung 2.9 und 2.10. Wie bei einem technischen System werden auch hier mittels Messfühler, z.B. den Pressorezeptoren im Aortenbogen, die aktuelle IST-Situation an das Kreislaufzentrum über die Afferenzen frequenzcodiert gemeldet. Dieser Wert wird mit dem Sollwert verglichen und situativ die jeweiligen notwendigen Steuermechanismen mittels efferenter Impulse zu Herz und Gefäßen aktiviert. Zwei Gruppen von Sensoren stehen für die afferente Signalisierung zur Verfügung. Dies sind die Barorezeptoren im Hochdrucksystem, d.h. Dehnungs- oder Pressorezeptoren in der Aorta und in der Aorta carotis sowie im Niederdrucksystem. Dies sind Dehnungssensoren bzw. Volumensensoren in der Venae Cavae, in den Vorhöfen und im linken Ventrikel. Sie messen den arteriellen Blutdruck, die Pulsfrequenz sowie den Füllungsdruck bzw. indirekt das Blutvolumen im Niederdrucksystem. Daneben spielen weitere aktivierende Zuströme von Mechanorezeptoren und Nozirezeptoren, arteriellen Chemorezeptoren, respiratorischen Neuronen und höhergelegenen Zentren ebenfalls eine wichtige Rolle bei der zentralen Kontrolle des Kreislaufs, wobei die von den Pressorezeptoren über den Nucleus tractus solitarii kommenden Afferenzen den größten Einfluss haben [171]. In Abbildung 2.11 ist zu erkennen, dass die afferenten Aktionspotentiale der im Aortenbogen sitzenden Barorezeptoren über den Nervus Vagus (X), während die der im Karotissinus ansässigen Pressosensoren über den Karotissinus-Nerv weitergeleitet werden, welcher in den IX. Hirnnerv, den Nervus glossopharyngeus übergeht [159].

Das Kreislauf-Zentrum kann in zwei Felder untergliedert werden, das *pressorische* und *depressorische Feld* wie es in Abbildung 2.10 zu sehen ist. Die Neurone des pressorischen Gebietes senden kontinuierlich sympathische Impulse an Herz und Gefäße, die die Herzleistung steigern und vasokonstriktorisch wirksam sind. Dabei stehen sie in enger Verbindung mit den mehr medial gelegenen Neuronen des depressorischen Gebietes. Werden die Vaguskerne, die mit diesen beiden Feldern verbunden sind, erregt, ist eine Verringerung der Herzfrequenz und der Überleitungsgeschwindigkeit die Folge. Zusätzlich bestehen Querverbindungen zum *Atemzentrum* [177].

Der **Baroreflex-Mechanismus** dient in erster Linie der Stabilisierung des arteriellen Blutdrucks. Ein akut zu hoher Blutdruck aktiviert das depressorische Feld durch eine erhöhte afferente Impulsrate. Die entsprechende Reflexantwort erregt den Parasympathikus und hemmt den Sympathikus mit der Folge einer Bradykardie und Vasodilatation, was die Senkung des Herzzeitvolumens (HZV) und des peripheren Widerstands

(TPR) zur Folge hat und schließlich in der Reduktion des arteriellen Blutdrucks resultiert. Im gegenteiligen Fall eines akuten Blutdruckabfalls werden die pressorischen Felder aktiviert und das HZV und der TPR angehoben, womit der Blutdruck wieder steigt.

Bei einem erhöhten venösen Rückstrom oder Vorhofdruck werden die Dehnungssensoren in den Venen und Wänden des linken und rechten Atriums stimuliert. Dies löst durch die Anregung des Sympathikus eine Tachykardie und Steigerung der Herzkraft aus, welche in der Steigerung des Herzzeitvolumens mündet. Dieser Effekt ist auch als *Bainbridge-Reflex* bekannt, jedoch ist dessen physiologische Bedeutung noch nicht ganz geklärt. Es wird vermutet, dass er den Frank-Starling-Mechanismus ergänzt [159].

Das Zeit- und Regelungsverhalten der Steuermechanismen des Kreislaufs

Die verschiedenen Regelungsmechanismen haben im Wesentlichen zwei unterschiedliche Charakteristiken im zeitlichen Verhalten, wie bereits in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben. Einerseits existieren Prozesse der Kurzzeit-Regelung, die innerhalb von Sekunden ansprechen und andererseits Prozesse der Langzeit-Regelung, die erst nach Stunden ansprechen, siehe Abbildung 2.12. Dabei ist der Baroreflex den kurzzeitigen Mechanismen zuzuordnen, denn er zügelt den arteriellen Blutdruck von Schlag zu Schlag. Des Weiteren passt er sich dynamisch den körperlichen Anforderungen an. Der Nachteil davon ist, dass auch ein chronischer Hochdruck durch den Baroreflex stabilisiert wird, da die Schwelle, an der der Baroreflex aktiviert wird ebenfalls steigt [63, 89]. Eine langfristige Regelung des Blutdrucks ist damit nicht möglich.

Die Langzeit-Regelung des Blutdrucks erfolgt durch die Anpassung des Blutvolumens. Dies wird durch die Kontrolle der renalen Flüssigkeitsausscheidung erreicht. Neben den sympathischen Nierennerven sind daran einige humorale Systeme und Hormone beteiligt. Dazu gehören das Renin-Angiotensin-Aldosteron-System, das ANP und das von der Hypophyse ausgeschiedene ADH durch Osmorezeptoren im Hypothalamus. Alle Mechanismen zusammen agieren, um ein konstantes zirkulierendes Volumen zu erhalten.

Dazwischen stehen die Regelungsmechanismen mit einer mittleren Ansprechzeit wie die Steuerung der kapillären Flüssigkeit. Der einzige Mechanismus der einer echten

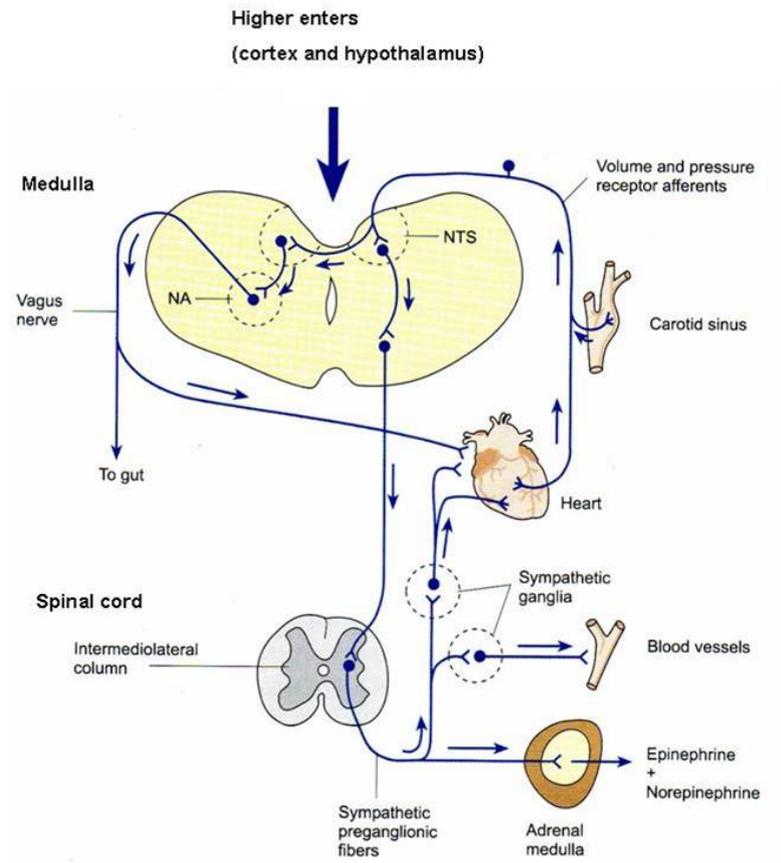


Abb. 2.9: Schema der sympathischen und parasympathischen Innervation des kardio-
vaskulären Systems; NTS= Nucleus tractus solitarii; NA= Nucleus ambiguus; modifi-
ziert nach [159]

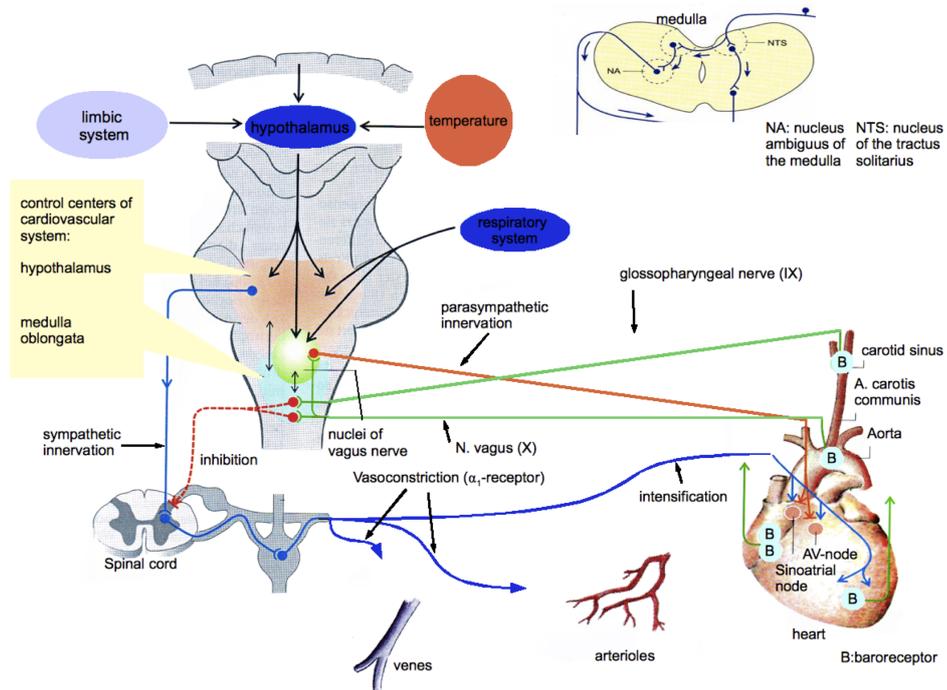
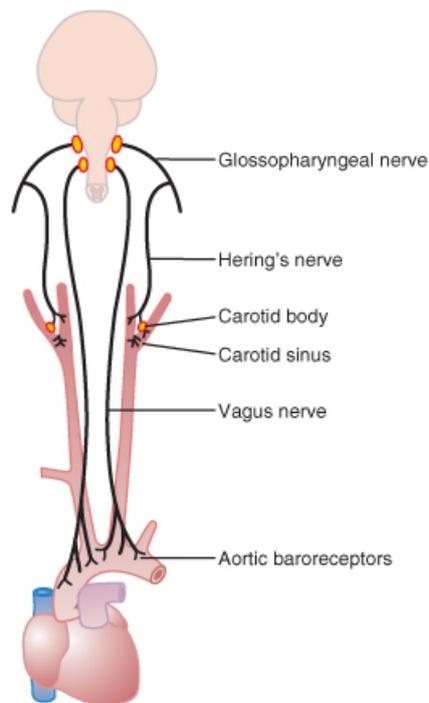


Abb. 2.10: Zentrale Kreislaufregulation, modifiziert nach [177]



© Elsevier. Guyton & Hall: Textbook of Medical Physiology 11e - www.studentconsult.com

Abb. 2.11: Barorezeptoren, entnommen aus [79]

Regelung entspricht, ist die renale Blutvolumenkontrolle durch die Nieren. Von weiterer Bedeutung sind die verschiedenen Wirkbereiche der einzelnen Regelungsmechanismen wie es in Abbildung 2.13 dargestellt ist. Auch hier ist der Baroreflex der wichtigste Prozess, da er nicht nur der schnellste ist sondern im Bereich des normalen arteriellen Blutdrucks die beste Wirkung aufweist [81].

Die blutdruckregulierenden Hormone

Atriales natriuretisches Peptid

ANP ist ein zyklisches Peptid und wird von den Myozyten im Vorhof des Herzens gebildet. ANP wird den Hormonen des Herzens, der Blutgefäße und der Niere zugeschrieben. Es besteht aus 29 Aminosäuren mit einer Disulfid-Brücke. Es hat eine stark diuretische und natriuretische Wirkung, damit vergrößert es die glomeruläre Filtrationsrate der Niere, d.h. es vermindert im Sammelrohr die Reabsorption von Na^+ -Ionen und Wasser. Die Ausscheidung von Wasser und Kochsalz über Urin wird erhöht, und dadurch wird das Blutvolumen gesenkt. ANP funktioniert als Antagonist des Renin-Angiotensin-Systems. Außerdem zeigt es eine ausgeprägte vasodilatatorische Wirkung auf Blutgefäße. Damit gelingt ein Abfall des systolischen und diastolischen Blutdrucks. Das Blutvolumen im Herz nimmt ab, dafür erhöht sich die Herzschlagfrequenz.

Endotheline

Endotheline sind Peptide aus 21 Aminosäuren, sie kommt in drei Isoformen vor (ET-1, ET-2, ET-3) und hat eine bizyklische Struktur. Die Entstehung findet in den Endothelzellen der Blutgefäße statt. Die Wirkung ist vasokonstriktorisch, es gilt als der am stärksten wirksame Regulator des Blutdrucks. Antagonisten der Endotheline sind deswegen von großem Interesse für die Therapie von Krankheiten, bei denen die Blutdruck-Regulation oder der Blutfluss durch Organe gestört ist. Bei der Entstehung in den Endothelzellen kommt es zu einer parakrinen Wirkung auf die darunter liegenden glatten Muskulaturzellen.

Bradykinin

Bradykinin ist ein Nonapeptid und zählt zu der Gruppe der Kinine. Es wird durch Kininogenasen aus seinen inaktiven Vorläuferproteinen, den Kininogenen, freigesetzt. Durch seine gefäßerweiternde Wirkung kann es zur Blutdrucksenkung beitragen. Außerdem sorgt es lokal für die Kontraktion der Bronchial-, Darm- und Uterus-Muskulatur.

Angiotensin II

Angiotensin II wird primär in der Niere gebildet. Es ist ein Oktapeptid. Eine entscheidende Rolle nimmt es innerhalb des Renin-Angiotensin-Aldosteron-Systems ein. Angiotensin II hat eine stark kontrahierende Wirkung auf periphere Arteriole und erhöht somit über den peripheren Widerstand den Blutdruck. Außerdem stimuliert es über die Biosynthese von Aldosteron und nimmt somit Einfluss auf den Natriumhaushalt. Daneben hat es noch eine modulierende Wirkung auf die Nervenendigungen des sympathischen Systems und fördert hierbei die Freisetzung von Catecholaminen. Eine weitere Wirkung ist der Einfluss auf das ZNS in Gehirnbereichen außerhalb der Blut-Hirn-Schranke. Dort wird das Durstgefühl und der Appetit auf Salz durch die Förderung der Sekretion von Vasopressin gesteuert.

Aldosteron

Aldosteron ist ein Steroidhormon. Aus Cholesterin wird über die Zwischenstufe Pregnenolon das Progesteron gebildet. Durch Hydroxylierung entsteht Desoxycorticosteron und durch eine weitere Hydroxylierung wird Corticosteron gebildet. In einer anschließenden Oxidation entsteht daraus das Aldosteron. Aldosteron reguliert die Rückresorption von Natrium- und Chloridionen in der Niere. Parallel hierzu werden Kalium-, Wasserstoff- und Ammoniumionen ausgeschieden. Die Hauptwirkung des Aldosterons besteht also in einem Austausch von Kalium- und Wasserstoffionen gegen Natriumionen im distalen Tubulus der Niere.

Antidiuretisches Hormon

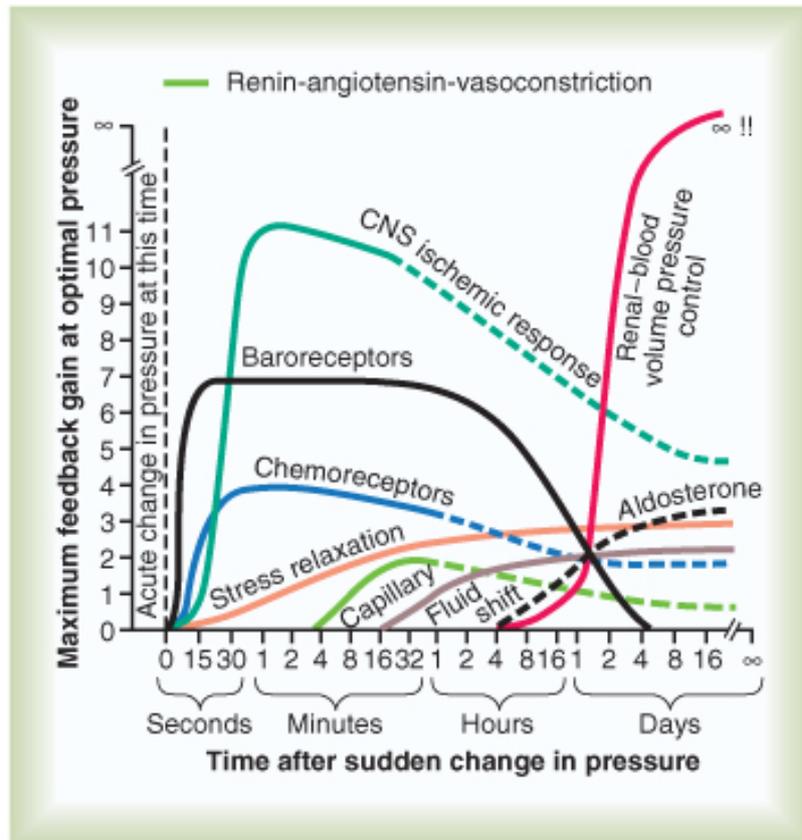
ADH wird in einem Kerngebiet des Hypothalamus von Nervenzellen produziert. Im Falle von Wassermangel im gesamten Organismus wird das Blutserum hyperton. Durch Osmorezeptoren im Hypothalamus wird der Mangel festgestellt, das wiederum führt zur Freisetzung von ADH aus der Neurohypophyse. ADH wird über den Blutkreislauf zum Sammelrohr der Niere transportiert und dockt an die Epithelzellen an. Diese Zellen sind normalerweise für Wasser undurchlässig und vermeiden die Rückresorption von Wasser aus dem Harn. ADH koppelt nun an membranständige Rezeptoren, die im Inneren der Zelle eine Ausschüttung von Calcium auslösen, was wiederum zum Andocken von Vesikeln an die Zellmembran führt, die das Aquaporin beinhalten. Die Aquaporine werden in die Zellmembran eingesetzt, dadurch wird sie durchlässig für Wasser, dieses wird osmotisch aus dem Harn zurück ins Blut gezogen. Außerdem hat es eine stark gefäßverengende Wirkung. Dadurch steigen das Blutvolumen und der

periphere Widerstand.

Adrenalin, Noradrenalin und Dopamin

Adrenalin, Noradrenalin und Dopamin gehören der Gruppe der Catecholamine an. Die Biosynthese findet in Catecholamin-Neuronen im Nebennierenmark statt. Sie geht von den Aminosäuren Tyrosin oder Phenylalanin aus. Diese werden zu L-DOPA hydroxyliert. Nach einer Decarboxylierung zum biologisch aktiven Dopamin erfolgt eine stereoselektive Hydroxylierung zum Noradrenalin, welches auch aus dem Nebennierenmark freigesetzt werden kann und darüber hinaus als Transmitter in sympathischen Neuronen funktioniert. Die N-Methylierung von Noradrenalin liefert schließlich das Adrenalin. Je nach Rezeptor haben sie eine unterschiedliche Wirkung. Von den durch Adrenalin vermittelten Effekten stehen die Wirkungen auf das Herz-Kreislauf-System im Vordergrund. Dazu zählt insbesondere der Anstieg des zentralen Blutvolumens. Dieser Effekt wird einerseits durch eine Kontraktion kleiner Blutgefäße, insbesondere in der Haut und in den Nieren, über eine Aktivierung von α_1 -Adrenozeptoren vermittelt. Andererseits wird eine β_2 -Adrenozeptoren-vermittelte Erweiterung zentraler und muskelversorgender Blutgefäße beobachtet. Die Aktivierung von β_1 -Adrenozeptoren führt am Herzen zu einer erhöhten Herzfrequenz (positiv chronotrope Wirkung), einer beschleunigten Erregungsleitung (positiv dromotrope Wirkung), einer erhöhten Kontraktilität (positiv inotrope Wirkung) und einer Senkung der Reizschwelle (positiv bathmotrope Wirkung). Diese Effekte verbessern die Herzleistung und tragen mit der Konstriktion kleiner Blutgefäße zur üblicherweise eintretenden Erhöhung des Blutdrucks bei [45].

Abschließend sind in Abbildung 2.14 alle an der Blutdruckregulation involvierten Mechanismen nochmals übersichtlich zusammengefasst.



© Elsevier. Guyton & Hall: Textbook of Medical Physiology 11e - www.studentconsult.com

Abb. 2.12: Die approximativen Stärken und zeitlichen Ansprechverhalten der an der Blutdruckregelung beteiligten Mechanismen. Beachtenswert ist die Möglichkeit einer unbeschränkten Verstärkung der renalen Blutvolumenregelung nach einigen Wochen [79].

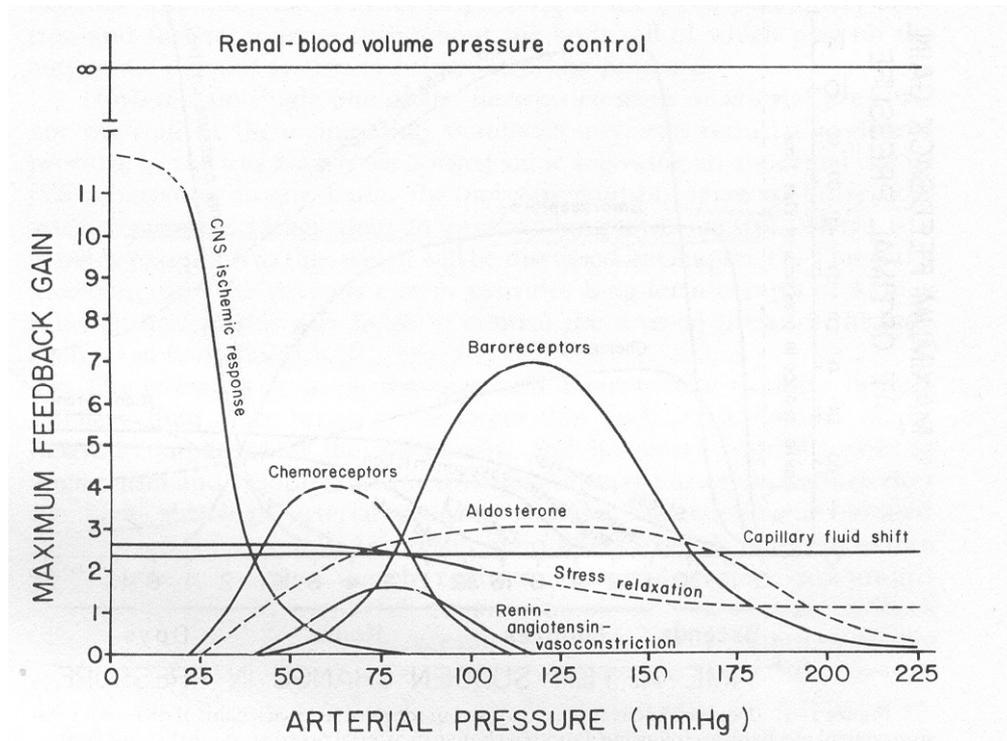


Abb. 2.13: Die optimalen Wirkbereiche der verschiedenen Regelungsmechanismen [81].

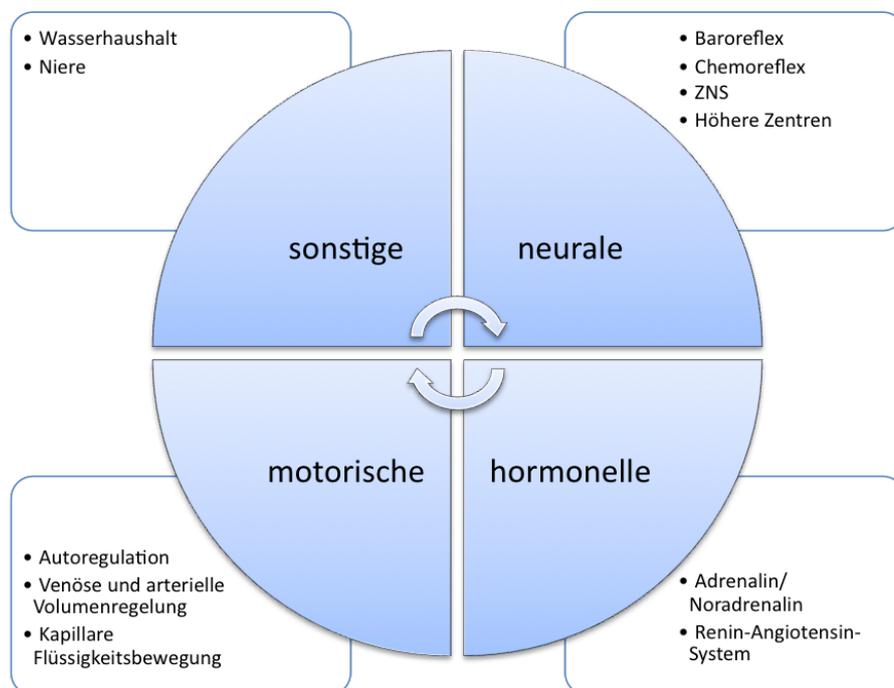


Abb. 2.14: Überblick der an der Blutdruckregulation beteiligten Mechanismen

2.1.1.2 Pathophysiologie der Hypertonie

Intrinsische und/oder extrinsische Störungen der natürlichen Mechanismen zur Aufrechterhaltung eines normalen Blutdrucks erzeugen Regeldefekte, die zu einem erhöhten oder erniedrigten Blutdruck (*Hypotonie*) führen können. Bluthochdruck oder *Hypertonie* bezeichnet einen dauerhaft erhöhten systemischen arteriellen Blutdruck [177]. Hypertonie ist weltweit der häufigste Risikofaktor für kardiovaskuläre und zerebrovaskuläre Erkrankungen [134]. In Deutschland sind Herz-Kreislaufkrankungen mit Abstand die häufigste Todesursache [51, 36].

Epidemiologie der Hypertonie

In der Bundesrepublik Deutschland liegen nach [134] die Hypertonieprävalenz bei ca. 40 % vor. Bei einer Gesamtbevölkerung von 82,5 Millionen Bundesbürgern im Jahr 2005 [36] entspricht dies rund 33 Millionen Bluthochdruckpatienten. Eine amerikanische Studie aus dem Jahr 2003 spricht sogar von einer Prävalenz in Deutschland von 55,3 % [209]. Nach [134] ist jedoch aufgrund der in den Vereinigten Staaten üblichen Klassifikation — mit höheren Grenzwerten als in Europa — auch bei diesen Zahlen von einer ca. 40 % Prävalenz auszugehen.

Beachtenswert ist jedoch in beiden Fällen die Tatsache, dass von diesen 33 Millionen Bundesbürgern, die einen zu hohen Blutdruck haben, lediglich etwas mehr als die Hälfte von ihrer Krankheit weiß. Von diesen Patienten ist wiederum nur ca. die Hälfte in Behandlung und nur ein kleiner Teil davon hat einen tatsächlich kontrollierten Blutdruck. In Abbildung 2.15 ist die Bevölkerung zwischen 35 und 64 Jahren mit einem Blutdruck von maximal 140/90 mmHg dargestellt und in drei Gruppierungen eingeteilt. Dabei fallen diejenigen Hypertoniker in die Gruppe „bekannt“, denen von medizinischer Seite her mitgeteilt wurde, dass sie Bluthochdruck haben, in die Gruppe „behandelt“, wenn sie medikamentös behandelt wurden, und in die Gruppe „kontrolliert“, wenn der Zielblutdruckwert der medikamentös behandelten Patienten unter 140/90 mmHg lag [209].

Es muss davon ausgegangen werden, dass die Zahl der Hypertoniker in Zukunft weiter zunehmen wird. Diese Entwicklung wird vor allem durch die beiden Hauptfaktoren Adipositas und Bewegungsmangel vorangetrieben. Die durchschnittliche Lebenserwartung sinkt rapide mit steigenden Blutdruckwerten [106].

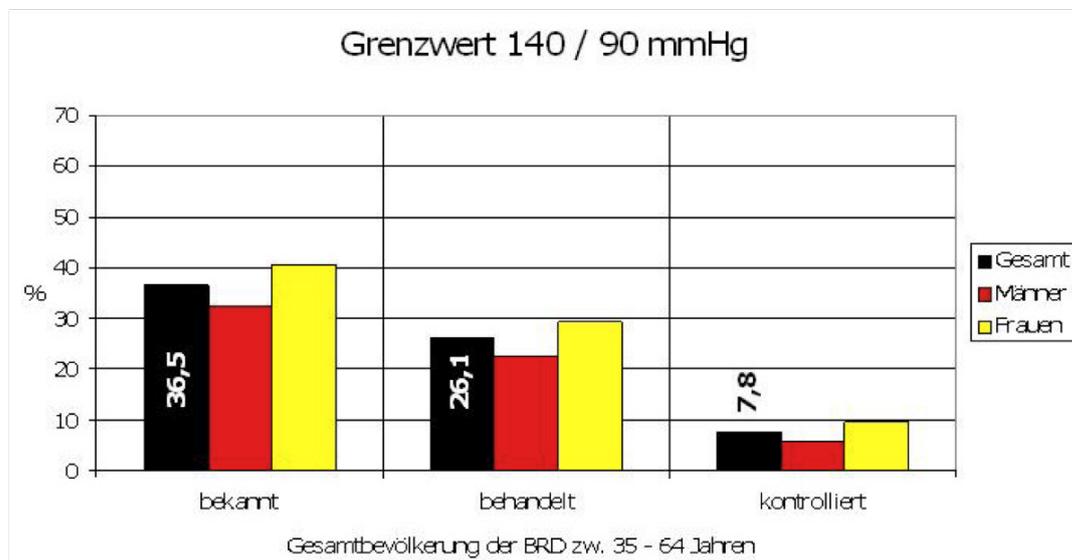


Abb. 2.15: Hypertonieprävalenz in der Bundesrepublik Deutschland bei einem Grenzwert von 140/90 mmHg, bezogen auf die Gesamtbevölkerung im Alter von 35-64 Jahren, nach [209].

Ätiologie und Pathogenese der Hypertonie

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Formen des Bluthochdrucks: Dies ist zum einen die **essentielle Hypertonie**, zum anderen die **sekundäre Hypertonie**. Bei letzterer wird auch von einer monokausalen Form der Hypertonie [134] gesprochen, da deren Ursachen bekannt und diese wiederum durch Krankheiten oder organische Schäden – meist an Niere, Herz oder Gehirn – bedingt sind. Die häufigsten Auslöser für eine sekundäre Hypertonie sind nach [134] und [159]:

- Nierenerkrankungen wie diabetische Nephropathie, chronische Niereninsuffizienz (so genannte renale Hypertonie),
- Herzerkrankungen wie Infarkt, Angina Pectoris, chronische Herzinsuffizienz,
- Zerebrovaskuläre Erkrankungen durch Schlaganfall oder zerebrale Blutung(en).
- Endokrine Erkrankungen wie Phäochromozytom², Conn-Syndrom³, Cushing-Syndrom⁴

Im Gegensatz dazu hängt die essentielle Hypertonie, die bei mindestens 90 % der Hypertoniker vorliegt, nicht wie bisher angenommen von einem unbekanntem Faktor, sondern von vielen bekannten Faktoren ab. Aufgrund dieses Zusammenspiels von ätiologischen und pathologischen, konstitutionellen und psychosozialen Faktoren spricht man auch nicht mehr von essentieller Hypertonie mit unbekannter Ursache, sondern vielmehr von einer **multifaktoriell bedingten primären Hypertonie** [134]. Die dabei am häufigsten auftretenden ätiologischen Faktoren sind:

- Adipositas,
- Genetik,
- Alter und Geschlecht,
- Ernährung,

² Tumor des Nebennierenmarks

³ primärer Hyperaldosteronismus, hervorgerufen überwiegend durch autonomes Adenom der Nebennierenrinde

⁴ Hyperkortisolismus, zu 70-80 % hervorgerufen durch ein ACTH produzierendes Hypophysenadenom

- körperliche Aktivität,
- Psyche,
- Stress,
- Alkohol- und Nikotinabusus.

Daneben können weiterhin folgende pathologische Mechanismen an der Entstehung der primären Hypertonie beteiligt sein:

- Erhöhung des Sympathikotonus,
- Volumenhochdruck durch einen gestörten Wasser-Salz-Metabolismus,
- Widerstandshochdruck durch das Gefäßsystem,

wobei das sympathische Nervensystem in der Pathogenese der Hypertonie eine herausragende Bedeutung hat.

In der Fachliteratur wird Hypertonie häufig als „silent killer“ beschrieben [89, 134]. Dies beschreibt den Zustand eines je nach Symptomatik mehr oder weniger beschwerdefreien Lebens mit der Bluthochdruckerkrankung, bis plötzlich einer der zahlreichen Folgeschäden einer Hypertonie auftritt. Die Schädigung des Körpers ist allerdings ein langwieriger und schleichender Prozess. Die Druckrezeptoren in den Gefäßen passen sich dem chronisch erhöhten Druck an. Das Zentralnervensystem erhält von den Rezeptoren nur noch warnende Rückmeldungen, wenn der Blutdruck den bereits dauerhaft erhöhten Wert übersteigt. Die beständige Druckbelastung der Arterienwände und der Gefäße fördert eine vermehrte Bildung von Muskelzellen (Hypertrophie), die die Elastizität einschränken. Diese arteriosklerotischen Veränderungen bewirken eine erhöhte Anfälligkeit des Endothels, der innersten Wandschicht der Arterien, infolgedessen sich dort vermehrt Kalk oder Fette anlagern können [187]. Bezüglich der krankhaften Gefäßveränderung ist insbesondere der diastolische Blutdruck von großer Bedeutung.

Der Bluthochdruck ist der häufigste und wichtigste Risikofaktor für den Apoplex (Schlaganfall): So hat ein Hypertoniker ein um den Faktor 4 erhöhtes Risiko, einen Schlaganfall zu erleiden. Damit ist der Bluthochdruck an einer Schlaganfallprävalenz

von 41,2 pro 100.000 Einwohner wesentlich beteiligt [165]. Nach Zahlen des statistischen Bundesamtes starben im Jahr 2005 allein 30.092 Bundesbürger an einem Schlaganfall [36]. Die weitaus höhere Anzahl an Patienten, die an den Folgeschäden eines Schlaganfalls leiden, sind hierbei nicht berücksichtigt.

Des Weiteren gibt es zahlreiche Organschäden, die durch eine Hypertonie hervorgerufen werden. Diese betreffen vor allem das zentrale Nervensystem (Demenz, Schlaganfall, Infarkte, Blutungen), das Herz (Infarkt, Hypertrophie, Insuffizienz) sowie die Nieren. Weitere Schädigungen können auch an den Augen, dem Gefäßsystem und an der Muskulatur auftreten.

Klassifikation der Hypertonie

Die folgende Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die aktuell geltenden Blutdruckkategorien. Die angegebenen Werte richten sich nach den einheitlichen Empfehlungen der *Deutschen Hochdruckliga e. V.* (DHL) [91], der *British Hypertension Society* (BHS) [203] sowie der *European Society of Hypertension* (ESH) [27] und in Anlehnung an die Empfehlungen der WHO und ISH [147].

Kategorie	Systole [mmHg]	Diastole [mmHg]
Optimaler Blutdruck	< 120	< 80
Normaler Blutdruck	< 130	< 85
Noch- normaler Blutdruck	130 - 139	85 - 89
Grad 1: Leichte Hypertonie	140 - 159	90 - 99
Grad 2: Mittelschwere Hypertonie	160 - 179	100 - 109
Grad 3: Schwere Hypertonie	≥ 180	≥ 110
Isolierte systolische Hyp.	≥ 140	< 90

Tab. 2.1: Definition und Klassifikation von Blutdruckbereichen nach [91, 203, 27]

Diese Klassifizierung nach Tabelle 2.1 berücksichtigt nur „reine“ Hypertoniker. Patienten, die weitere manifeste kardiovaskuläre Erkrankungen haben, unter Endorganschäden oder Diabetes mellitus leiden, sind aufgrund dieser Risikofaktoren in die jeweils entsprechend höhere Kategorie einzuordnen. Dasselbe gilt, falls systolische oder diastolische Werte in verschiedene Kategorien fallen.

Ein Sonderfall hierbei ist die isolierte systolische Hypertonie, bei welcher die systolischen Werte ≥ 140 und die diastolischen Werte < 90 mmHg sind. Nach heutigem Stand der Medizin hat die isolierte systolische Hypertonie die gleichen hohen Risiken

für Schlaganfall und koronare Herzerkrankungen wie es erhöhte diastolische Werte haben [91, 134].

Nach [170] und [177] liegen die häufigsten Blutdruckwerte von gesunden Erwachsenen zwischen dem 20. und dem 40. Lebensjahr bei einem systolischen Druck von 120 mmHg sowie einem diastolischen Druck von 80 mmHg. Das Gesamtspektrum der Blutdruckwerte dieser Altersgruppe liegt zwischen 100 und 150 mmHg bzw. zwischen 60 und 90 mmHg, wobei der systolische Blutdruck mit zunehmenden Alter kontinuierlich ansteigt. Bis zu einem Lebensalter von ca. 50 – 60 Jahren sind vorwiegend Männer von einer Hypertonie betroffen. Jedoch weisen auch Frauen ab einer Alterstufe ab ca. 60 ± 5 Jahren nach [134] die gleiche Prävalenz vor wie gleichaltrige Männer.

Weiterhin unterliegen die Blutdruckwerte einer – vermutlich endogenen – zirkadianen Periodik [134]. Die Werte durchlaufen normalerweise über 24 Stunden einen charakteristischen Tag-Nacht-Rhythmus, wobei es zu Schwankungen von 10 – 30 mmHg und mehr kommen kann. Dabei treten die niedrigsten Werte gegen 03:00 Uhr nachts auf, um mit dem Aufstehen bis ca. 09:00 Uhr vormittags anzusteigen. Gegen Mittag zeigt sich eine leichte Absenkung sowie gegen Abend teilweise nochmals ein leichter Anstieg. Diese Variabilität des Blutdrucks wird in der Fachliteratur als „*dipping*“- Verhalten beschrieben. Je nach Größe dieser Variabilität lässt sich dieses „*dipping*“- Verhalten – wie in Tabelle 2.2 dargestellt – in verschiedene Bereiche einteilen.

Begriff	Definition
Normal Dipper	nächtliche Blutdruckabsenkung zwischen 10 % und 20 % ggb. Tagesmittelwert
Nondipper	nächtliche Blutdruckabsenkung zwischen 0 % und 10 % ggb. Tagesmittelwert
Extreme dipper / overdipper	nächtliche Blutdruckabsenkung > 20 % ggb. Tagesmittelwert
Inverted / reverse dipper	nächtlicher Blutdruckanstieg ggb. Tagesmittelwert

Tab. 2.2: Definitionen des Dipping-Verhaltens nach [134]

Diese gut erforschte Tagesrhythmik ist nur ein Bestandteil der sogenannten *Chronopathologie*, die von Middeke geprägt worden ist [176] in [134]. Weitere zahlreiche und vielfältige Erkenntnisse in diesem Bereich liefern die Arbeiten von Lemmer [111, 112, 113].

2.1.1.3 Therapie der primären Hypertonie

Die angezeigte Therapieform der primären Hypertonie ist abhängig vom Schweregrad der Erkrankung und dem individuellen Risiko der Patienten. Mögliche Behandlungsmethoden reichen von allgemeinen Maßnahmen, Veränderung des Lebensstils bis hin zur medikamentösen Therapie mittels Antihypertensiva. Erst wenn die nicht-medikamentösen Interventionen nicht erfolgreich sind, ist die medikamentöse Therapie indiziert.

Das Ziel der antihypertensiven Behandlung ist die größtmögliche Reduktion des Risikos kardiovaskulärer Ereignisse und der Mortalität. Aus diesem Grund wird die Senkung zum Zielbutdruck angestrebt, der je nach individueller Situation bei 140/85 mmHg oder niedriger liegt. Für die Hypertoniebehandlung stehen mehrere, an verschiedenen Stellgliedern angreifenden Wirkstoffklassen zur Verfügung.

Medikamentöse Behandlungsformen

Die gängigsten medikamentösen Wirkstoffe, die bei der Hypertoniebehandlung zum Einsatz kommen, werden im Folgenden zusammen mit ihrer Pharmakodynamik kurz beschrieben.

Betablocker (z.B. Metoprolol; Bisoprolol):

Betablocker werden vielfach zur Behandlung von Bluthochdruck eingesetzt. Das Medikament besetzt die β -Rezeptoren, die an Muskelzellen verschiedener Organe, wie des Herzens, sitzen, und verhindert dadurch das Andocken von körpereigenen, blutdruckerhöhenden Stoffen, wie Adrenalin und Noradrenalin. Dadurch wird der Herzschlag verlangsamt und der Blutdruck gesenkt. Wegen der positiven Eigenschaften des Medikaments auf die Erholungsfähigkeit des Herzens finden Betablocker auch bei Herzinsuffizienz Anwendung [96, 134, 91].

Calciumantagonisten (z.B. Amlodipin; Lercanidipin (Carmen)):

Calciumantagonisten sind Vasodilantien die den Kalzium-Einstrom in die Zellen hemmen. Dies führt zu einer Entspannung der glatten Muskelzellen und infolgedessen zu einer Weitung der Blutgefäße. Durch den verringerten peripheren Widerstand wird der Blutdruck gesenkt [96, 134, 91].

ACE-Hemmer (z.B. Captopril; Enahexal) und Angiotensin-II-Antagonisten:

Das körpereigene Hormon Angiotensin II erhöht den Blutdruck, indem es eine Konstriktion der Gefäße veranlasst. Während ein ACE-Hemmer die Produktion des Hormons beeinträchtigt und dadurch die Konzentration verringert, blockiert ein Angiotensin-II-Antagonist, ähnlich wie ein Betablocker, die Bindungsstellen (AT_1 -Rezeptoren) des Hormons Angiotensin II an den Blutgefäßen [134, 91].

Diuretika (z.B. Indapamid):

Diuretika sind Medikamente, die in den Flüssigkeitshaushalt des menschlichen Körpers eingreifen und die Flüssigkeitsausscheidung fördern. Durch eine Abnahme der Flüssigkeitsmenge in den Blutgefäßen wird das Herz entlastet und der Blutdruck gesenkt. Diuretika werden entsprechend ihrem Wirkmechanismus und Wirkort in den verschiedenen Abschnitten der Niere unterteilt [96, 134, 91].

Diese 5 Hauptsubstanzgruppen werden heute zur Blutdrucknormalisierung für die Monotherapie als auch für die Kombinationstherapie verschiedener Therapieschemata empfohlen [91].

Häufig werden vor allem bei der medikamentösen Therapie die Medikationsvorgaben nicht eingehalten. Die American Heart Association (AHA) beschreibt die Unzuverlässigkeit der Patienten bei der Medikamenteneinnahme als das größte Problem bei der Behandlung der Krankheit. Die reduzierte oder unzuverlässige Einnahme von Medikamenten wird als „*Non-Compliance*“ bezeichnet [50]. Dazu gehören folgende Verhaltensmuster:

- Änderungen in der zeitlichen Medikamenteneinnahme,
- Änderungen der verordneten Dosierungen,
- „Drug-Holidays“, d.h. Unterbrechungen von mehr als 3 Tagen bei der Einnahme,
- Praxiscompliance, d.h. nur kurz vor dem Arztbesuch erfolgt eine regelgerechte Einnahme,

bis hin zum endgültigen Abbruch der Therapie, welche als „*Non-Persistence*“ bezeichnet wird [134]. Ein Hauptgrund für die geringe Therapietreue ist die negative Einstellung der Patienten bezüglich der Medikamente aufgrund der möglichen Nebenwirkungen. Sie halten die antihypertensiven Wirksubstanzen für potentiell schädlich

[134]. Die Patienten selbst würden wenn irgend möglich nicht medikamentöse Therapiekonzepte präferieren, von denen im folgenden Abschnitt die Wichtigsten vorgestellt werden.

Nicht medikamentöse Behandlungsformen

Die wichtigste Säule in der nicht medikamentösen antihypertensiven Therapie besteht aus den so genannten **Allgemeinmaßnahmen**. Sie sind bei allen Hypertoniegraden empfehlenswert und sollten immer therapieunterstützend durchgeführt werden [134, 182]. Zu den Bestandteilen der nicht medikamentösen Blutdrucksenkung gehören:

- Gewichtsreduktion,
- Ernährungsumstellung hin zu einer kochsalzarmen, kaliumreichen, mediterranen Kost und wenig Alkohol,
- Steigerung der körperlichen Aktivität,
- Entspannung sowie
- Stressbewältigung.

Lebensstiländerungen reduzieren nicht nur den Blutdruck sondern auch das Gesamtrisiko insbesondere bei dem überwiegenden Teil der Hypertoniker, da dieser neben Organschäden zusätzliche Begleiterkrankungen wie beispielsweise Übergewicht, metabolisches Syndrom oder Diabetes mellitus hat. Des Weiteren kann der Medikamentenverbrauch bei verbesserter Lebensqualität und erhöhter Lebenserwartung minimiert werden [136]. Allerdings sind Änderungen des Lebensstils, speziell bei mehreren Ansatzpunkten, sowie deren Integration in den Alltag nicht einfach und stellen oftmals eine große Hürde dar. Unterstützen können diesen Prozess Maßnahmen der Verhaltensmedizin sowie des Biofeedbacks. Für die erfolgreiche Umsetzung sind die Aufrechterhaltung der Motivation und Erfolgsmeldungen über einen längeren Zeitraum hinweg wichtig. Dies kann mittels geeigneter telemedizinischer Systeme realisiert werden.

Die nachgewiesenen Therapieerfolge der nicht medikamentösen Interventionen sind sehr gut. Bei leichter Hypertonie kann der Zielblutdruck alleine durch die Allgemeinmaßnahmen erreicht werden [134]. Bei schwereren Formen der Hypertonie wirken sie

therapieunterstützend und -verstärkend, so dass die Medikamenteneinnahme verringert werden kann. Potentielle Nebenwirkungen werden so ebenfalls reduziert.

Gewichtsreduktion ist für übergewichtige Hypertoniker die effektivste Therapie die es gibt. Sie ist sogar wirkungsvoller als jede medikamentöse Behandlung [136]. Daneben sind Sport und körperliche Aktivität, insbesondere aerobes Training von besonderer Bedeutung. Regelmäßiges Ausdauertraining fördert die Gewichtsabnahme und durch die Abnahme der sympathischen Aktivität auch die Senkung der Ruheherzfrequenz [33]. Moderates Training wirkt blutdrucksenkend, was bei leichter Hypertonie bereits zu einer Blutdrucknormalisierung führen kann. Bei einer mittelschweren Hypertonie immerhin noch zur Einsparung von Medikamenten [134].

An der Ausbildung einer dauerhaften primären Hypertonie spielen der Lebensstil, bestimmte Verhaltensweisen und psychosoziale Stressoren eine überragende Rolle [134]. Insbesondere chronischer Stress ist bei mindestens 20 – 30 % dieser Patienten für die Manifestation der Hypertonie verantwortlich. Ursache für den kurzfristigen als auch langfristigen Blutdruckanstieg bei der stressinduzierten Hypertonie ist eine gesteigerte zentrale Sympathikusaktivität. Gerade hier haben nicht medikamentöse Therapiekonzepte insbesondere verhaltenstherapeutische Ansätze, Entspannungsverfahren sowie Stressbewältigung einen sehr hohen Stellenwert [136, 87, 126, 53].

Eine **verhaltensmedizinische Behandlung** kann für alle dem Lebensstil und persönlichen Gewohnheiten zugeordneten Determinanten und psychologischen Aspekten, wie z.B. Depression, Ärger, Aggression, psychosozialer Stress, angebracht sein. Sie vereint Komponenten aus Psychologie, Medizin und Verhaltenstherapie.

Entspannungsverfahren sind Methoden zur Verringerung körperlicher und geistiger Anspannungen durch die Veränderung physiologischer wie auch psychologischer Prozesse. Alle Techniken haben die *Entspannungsreaktion*, das Gegenteil der Stressreaktion, zum Ziel. Sie aktivieren den Parasympathikus und reduzieren den Sympathikotonus, die sich in folgenden vegetativen Reaktionen äußern:

- Abnahme des Muskeltonus,
- langsame und gleichmäßige Atmung,
- reduzierter Sauerstoffverbrauch,
- verstärkte Hautdurchblutung,

- verringerte Hautleitfähigkeit,
- Abnahme der Herzfrequenz,
- Senkung des arteriellen Blutdrucks sowie
- zentralnervöse Veränderungen wie die Zunahme langsamer Delta-Wellen im EEG.

Zu den bekanntesten Entspannungsverfahren mit guter Eignung bei Hypertonie oder kardiovaskulären Erkrankungen gehört die *progressive Muskelrelaxation* nach Jacobson, das *autogene Training*, diverse *Meditationsverfahren* und *Yoga* [76, 143]. Als weitere komplementärmedizinische Methoden sind die Hypnose, Akupunktur, Homöopathie und noch verschiedene andere erwähnenswert. Bei den letztgenannten Verfahren kann ein positiver therapeutischer Effekt entstehen, der wissenschaftlich jedoch nicht erwiesen bzw. anerkannt ist. Empirische Untersuchungen zeigen wiederholt, dass damit dennoch der Blutdruck gesenkt werden kann [56, 87]. Erfolgreiche Entspannungsreaktionen als Folge der angewandten Verfahren sind unzweifelhaft, diese korrelieren jedoch mit den persönlichen Präferenzen der Patienten für einzelne Methoden.

Eine weitere wesentliche Säule in der Therapie der stressinduzierten Hypertonie ist die Einübung geeigneter **Stressbewältigungsstrategien** (*Coping*). Vorrangiges Ziel ist die Erkennung derjenigen Verhaltens- und Verarbeitungsmuster, die zu einer Blutdrucksteigerung führen. Dabei ist **Biofeedback** und speziell das Blutdruck-Biofeedback ein besonders gutes Hilfsmittel. Bereits in den frühen siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts wurde die Wirksamkeit von Biofeedback zur Blutdrucksenkung bei essentieller Hypertonie erfolgreich nachgewiesen [127]. Durch die Rückmeldung körperlicher (physiologischer und zentralnervöser), dem Bewusstsein üblicherweise nicht zugänglicher, Reaktionen in verschiedenen Stresssituationen werden die eigenen Bewertungsmuster und Denkschemata widergespiegelt. Mittels verschiedener Biofeedback-Trainingsmethoden können angemessene Verhaltensweisen eingeübt und somit eine *kognitive Umstrukturierung* initiiert und umgesetzt werden.

Zu den effektivsten Verfahren gehören nach [126, 127] das:

- **Temperatur-Biofeedback**, dabei wird die Finger- oder Fußtemperatur ermittelt. Mittels entsprechenden Hand- oder Fußwärmungstraining lernen die Patienten, die durch erhöhte Sympatikusaktivität hervorgerufene Vasokonstriktion

zu reduzieren und somit den peripheren Widerstand zu senken und den Blutfluß zu erhöhen.

- **EMG–Biofeedback**, die *Elektromyografie*, d.h. die Bestimmung der Muskel–Aktivität. EMG–Feedback führt eine allgemeine Entspannung herbei und bewirkt dadurch eine Verringerung der autonomen Erregung. Die daraus resultierende Vasodilatation der Muskeln senkt den peripheren Widerstand und somit den Blutdruck.
- **elektrodermale Biofeedback**, d.h. die Erfassung der Hautleitfähigkeit. Die elektrodermale Aktivität ist direkt proportional zur Schweißproduktion, welche wiederum sympathisch in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen wie beispielsweise der Umgebungstemperatur oder dem einwirkenden Stress hervorgerufen wird.
- **RSA–Feedback**, die *respiratorische Sinusarrhythmie* führt bei entsprechender Ruheatmung zur Synchronisation mit der Herzfrequenz und zur Resonanz mit den Oszillationen der Barorezeptoren. Die Blutdrucksenkung wird hier im Gegensatz zum Temperatur–Biofeedback über eine Steigerung der parasympathischen Aktivität erlangt.
- **Blutdruck–Biofeedback**, genauer das *direkte Online–Blutdruck–Biofeedback* wird mit einer kontinuierlichen Beat-to-beat-Analyse und zeitgerechter Anzeige der Blutdruckwerte auf einem Monitor realisiert. Die kontinuierliche Blutdruckmessung erfolgt über eine Fingermanschette mit dem Finapres–Gerät (*finger arterial blood pressure monitoring*). Dieses Verfahren wird erfolgreich u.a. von Piesbergen und Middeke in der Therapie bei stressinduzierter Hypertonie eingesetzt [134, 157]. Somit kann der Blutdruckverlauf während einer therapeutischen Sitzung direkt beobachtet werden und muss nicht mehr wie bisher auf konventionelle Art indirekt ermittelt werden. Dieser Ansatz wurde in der Reha–Klinik Glotterbad zu einer neuen psychophysiologischen Methode, dem *Blutdruck-Video*, erweitert. Zusätzlich zur Messung und direkten Rückmeldung des Blutdrucks erfolgt eine audiovisuelle Aufzeichnung des Hochdruckpatienten inklusive Wiedergabe und Besprechung [174].

In den letzten Jahren kommt dem *Herzratenvariabilitätstraining (HRV)* eine immens zunehmende und mittlerweile überragende Beachtung zu. Durch die Ermittlung und

Visualisierung der Herzfrequenzvariabilität können sehr leicht Rückschlüsse auf die sympathovagale Balance und damit auf das kardiovaskuläre System gezogen werden [32, 158]. Das HRV ist zunehmend erfolgreich wissenschaftlich untersucht. In diesem Zusammenhang ist ebenfalls das *Resonanzfrequenzherzraten-Biofeedback* (Resonant Frequency Training) zu nennen, welches ebenfalls an Bedeutung in der antihypertensiven Therapie gewinnt [75, 109, 31].

Gegenüberstellung der Behandlungsformen bei Hypertonie

Es gibt eine unüberschaubare Zahl an Studien, die die Untersuchung der klinischen Wirksamkeit der verschiedenen vorgestellten Therapieformen für sich alleine oder zueinander zum Inhalt haben. Die immer wiederkehrende Problematik ist die Vergleichbarkeit und Gegenüberstellung der Studienergebnisse der diversen Untersuchungen. Alle haben unterschiedliche Ziele und Ansätze im Studiendesign, dem Setting, der Fallgruppengröße und Kontrollgruppe sowie vieles mehr. Dennoch soll anhand einiger subjektiv ausgewählter Studien und Meta-Analysen das Potential der verschiedenen Behandlungsformen gegenüber gestellt werden.

Objektive Bewertungsmaßstäbe können folgende Effektgrößen sein:

- Effektivität der Blutdrucksenkung absolut und im Mittel,
- Effektivität der Blutdrucksenkung relativ zueinander,
- Einsparung von Medikamenten,
- Statistische Signifikanz,
- Stabilität der Blutdrucksenkung, d.h. wie lange hält die Wirkung an.

Bei der medikamentösen Therapie gilt eine diastolische Blutdrucksenkung von 5–6 mmHg als klinisch bedeutsam, da sich dadurch das Risiko der Entwicklung einer koronaren Herzerkrankung deutlich vermindern lässt [126].

Der Vergleich der Effizienz der medikamentösen und nicht medikamentösen Therapieverfahren nach Tabelle 2.4 zeigt deutlich, dass nicht medikamentöse Interventionen ebenso erfolgreiche Ergebnisse hervorbringen wie die klassischen pharmakologischen Therapien. Dies bestätigt den systemischen Ansatz einer akustischen Biofeedback-Therapie. Nicht medikamentöse Interventionen sind eine ideale adjunkte Therapie,

Verfahren	Blutdrucksenkung [mmHg]	Risiko
β -Blocker	ca. 17 sys	
	ca. 12 dia	+
Calciumkanalblocker	keine Angaben	
Diuretika	ca. 14 sys	
	ca. 8 dia	+
ACE-Hemmer	keine Angaben	
Gewichtsreduktion	ca. 2–3 sys	
	ca. 1–2 dia	
	pro kg	–
Ernährung	ca. 6–11 sys	
	ca. 3–6 dia	–
Körperliche Aktivität/Sport	ca. 8 sys	
	ca. 6 dia	0
Biofeedback	ca. 4–22 sys (im Mittel 12)	
	ca. 4–15 dia (im Mittel 9)	–
Stressbewältigung	ca. 7–20 sys (im Mittel 14)	
	ca. 7–15 dia (im Mittel 11)	–
Entspannungsverfahren	ca. 2–17 sys (im Mittel 9)	
	ca. 2–14 dia (im Mittel 6)	–
Kombinationstherapie	ca. 8–26 sys (im Mittel 17)	
	ca. 1–20 dia (im Mittel 9)	–

Tab. 2.4: Übersicht der Therapiemöglichkeiten mit ihren zu erwartenden Wirksamkeiten bei primärer Hypertonie, nach [126] und [134].

mit der der Blutdruck ohne störende Nebenwirkungen kurzfristig wie auch längerfristig gesenkt werden kann [134].

2.1.2 Indikation für eine akustische Biofeedback-Therapie bei Bluthochdruck

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der primären Hypertonie, vor allem der stressinduzierten Hypertonie. Wünschenswertes Ziel ist es, eine systemisch wirkende, am zentralen Nervensystem ansetzende und kausale Therapie zu schaffen. Neben den in Kapitel 2.1.1.3 bereits erwähnten etablierten nicht medikamentösen Behandlungsformen der Hypertonie ist ebenso Musik als Therapeutikum zu nennen. Zahlreiche Publikationen zeigen, dass akustische Signale metabolische und zentralnervöse Funktionen modulieren können. Es ist bekannt, dass Klänge bestimmte physiologische Wirkungen beim Menschen hervorrufen können. Ein oft beschriebener Effekt ist die blutdrucksenkende Wirkung von speziellen Musikstücken und iterativen Klangmustern [43, 182, 90, 35]. Mit diesem positiven Wirkmechanismus soll hier Musik als Stellglied zur Regulation des Blutdrucks ausgenutzt werden. Warum das so ist und wann eine akustische Therapie indiziert ist wird in den nächsten Abschnitten dieses Kapitels herausgearbeitet.

2.1.2.1 Hören als therapeutischer Kanal

Die Wahrnehmung einfacher akustischer Signale wie auch komplexer Klänge und Musik beginnt mit dem Hören. Schallsignale jeder Art werden mit dem Ohr empfangen und vom äußeren, peripheren Ohr bis zum zentralen, inneren Hörorgan transportiert. Dort werden die akustischen Reize in Nervenimpulse umgewandelt und über den *Nervus vestibulocochlearis*, dem zentralen Hörnerv, über mehrere neuronale Stationen bis zum primären Kortex geleitet und die Informationen weiterverarbeitet. An dem gesamten hochkomplexen Prozess sind viele verschiedene Gehirnareale beteiligt und er ist bis heute noch nicht vollständig verstanden. Insbesondere die Wahrnehmung und Verarbeitung von Musik ist Gegenstand vieler aktueller Forschungsarbeiten [108, 114].

Anatomie und Physiologie des Hörens

Das Ohr besteht aus dem Außen-, Mittel- und Innenohr wie es Abbildung 2.16 zeigt. Das Außen- und Mittelohr ist dem peripheren Hörsystem zugeordnet, welches ein

Schallleitungssystem ist. Dagegen bildet das Innenohr als Schallempfindungssystem das zentrale Hörsystem. Das von den Schalldruckschwankungen in Schwingung versetzte Trommelfell leitet diese mittels der drei Gehörknöchelchen, Hammer, Amboss und Steigbügel, weiter an die Membran des *ovalen Fensters*. Mit dem ovalen Fenster beginnt das Innenohr mit seinem Labyrinthgang sowie der Übergang von Luftleitung zur Flüssigkeitsleitung. Die Übertragungsmechanismen im Mittelohr sorgen für die notwendige Schalldruckverstärkung und Impedanzanpassung für eine möglichst verlustarme Schallübertragung [177].

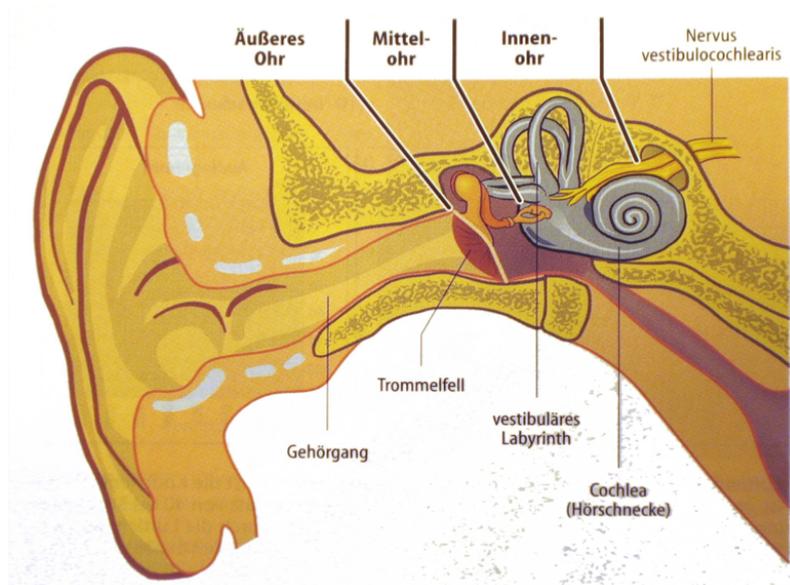


Abb. 2.16: Querschnitt Außen-, Mittel- und Innenohr, entnommen aus [171]

Das Innenohr schließlich enthält neben dem *Vestibularorgan* oder Gleichgewichtsorgan auch die Cochlea mit dem eigentlichen Hörgan, dem *Corti-Organ*. Hier werden die akustischen Reize an die Sinneszellen geleitet und dort weiter in Nervenimpulse transformiert. Die Cochlea ist ein mit Lymphe gefülltes, spiralförmig aufgewickelter System aus drei Gängen. Ausgerollt wäre sie etwa drei bis vier Zentimeter lang und hätte einen Durchmesser, der sich von 0,9 mm am ovalen Fenster auf 0,3 mm am Ende verjüngt [105]. Zwischen den beiden mit Perilymphe gefüllten Flüssigkeitsräumen, der *Scala vestibuli* und der *Scala tympani* liegt die *Scala media*, ein mit Endolymphe gefüllter Schlauch. Dieser ist von den beiden anderen Gängen nach oben durch die Reissner-Membran und nach unten durch die Basilarmembran getrennt. Dazwischen

sitzt das Cortische Organ mit seinen 10000 – 12000 äußeren Haarzellen und 3500 inneren Haarzellen auf der Basilarmembran. Am *Helicotrema*, der Schneckenspitze, geht der Vorhofgang in den Paukengang über. Abbildung 2.17 stellt den Querschnitt durch eine Cochleawindung dar und Abbildung 2.18 zeigt ein Bild des Cortischen Organs.

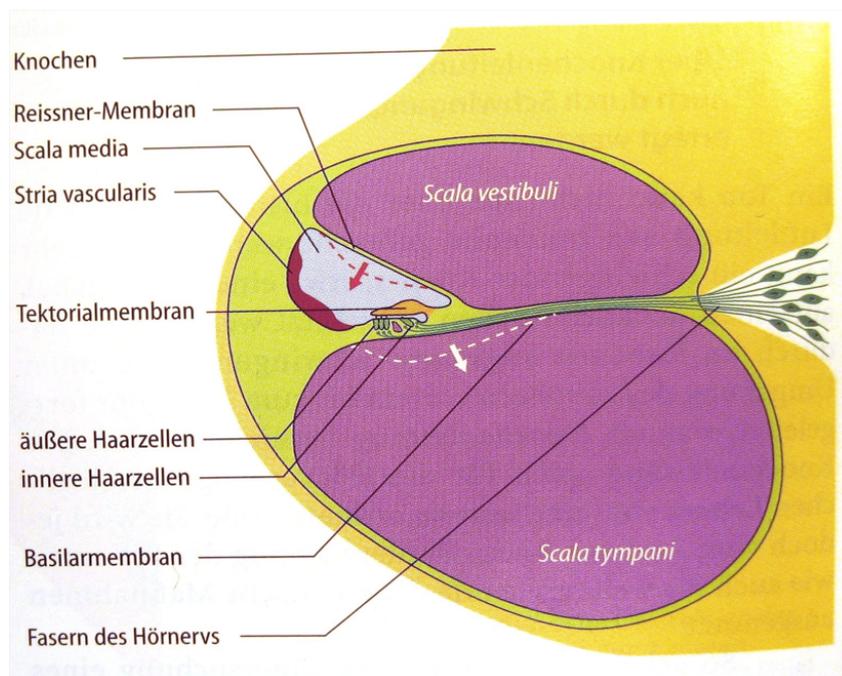


Abb. 2.17: Querschnitt durch eine Cochleawindung, entnommen aus [171]

Bewegungen der Gehörknöchelchen im Mittelohr werden über das ovale Fenster ins Innenohr weiter gegeben und versetzen dort die Flüssigkeit in Schwingung. Durch die geschickte Form der Cochlea und der sich ändernden mechanischen Eigenschaften der Basilarmembran findet hier eine Frequenz-Orts-Transformation statt: Auf der Basilarmembran bilden sich Wanderwellen aus, die an einem frequenzabhängigen Ort ihr Amplitudenmaximum haben. Die relative Bewegung zwischen der schwingenden Basilar- und der Tektorialmembran sorgt an genau dieser Stelle zu einer Abscherung der Haarzellen im Cortischen Organ, die daraus neuronale Impulse erzeugen und diese an den Hörnerv weiterleiten [177].

Hochfrequente Töne werden dabei in der Nähe des ovalen Fensters detektiert, niederfrequente Töne am Ende der Cochlea. Die Frequenz-Orts-Zuordnung der insgesamt etwa 640 wahrnehmbaren Tonhöhen ist allerdings nur bis etwa 500 Hz linear und darüber logarithmisch [59]. Dieser Zusammenhang ist für die psychoakustische Wahrnehmung

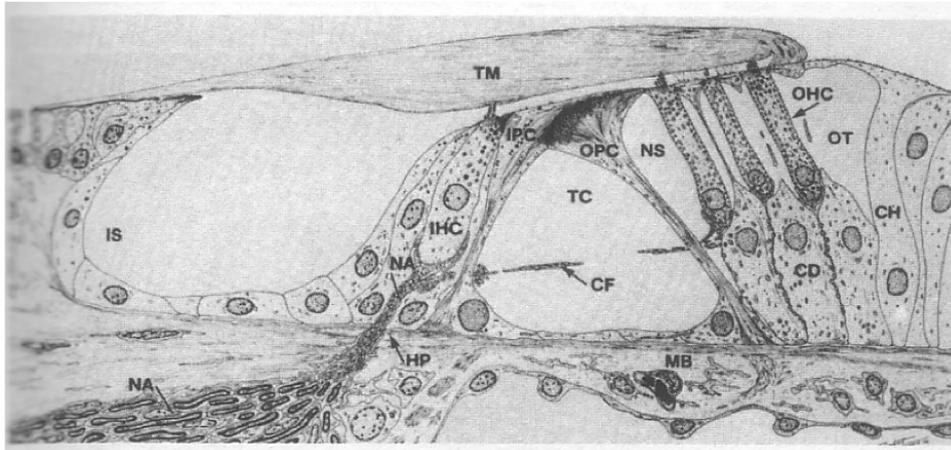


Abb. 2.18: Das Cortische Organ, entnommen aus [86] nach [168]. Es bedeuten: TM Tektorialmembran, IHV innere und OHC äussere Haarzellen, NA Nervus acusticus, CF efferente 'tunnel crossing fibers', HP habenula perforata, TC innerer Tunnel, IPC innere und OPC äussere Stützzellen, CD Dieters-Zellen, CH Hensen-Zellen

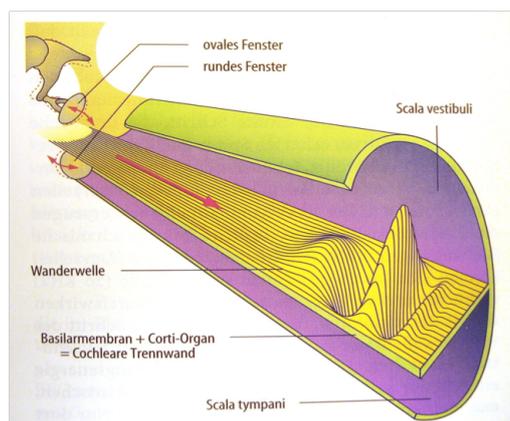


Abb. 2.19: Frequenz-Orts-Transformation durch die Wanderwelle, entnommen aus [171]

und bei der Bestimmung charakteristischer Eigenschaften blutdrucksenkender Musik sehr wichtig.

Allerdings wird nur die Tonhöhe vom Ohr so fein wahrgenommen. Lautstärke, Klangfarbe oder Richtung des Schalls werden in so genannten Frequenzgruppen für ein ganzes Frequenzband gemeinsam ausgewertet. Davon besitzt das menschliche Gehör 24, die bis 500 Hz eine konstante und danach eine logarithmisch wachsende Breite haben, so dass die Basilarmembran im Endeffekt in 24 gleichlange Abschnitte eingeteilt ist [59].

Die Frequenzgruppen sind eine ideale Anpassung des Gehörsinns an die Anforderungen. Zum einen sind sie breit genug, um eine schnelle Einschwingzeit von etwa 10 ms zu ermöglichen. Bei schmaleren Frequenzgruppen müssten die Nervenzellen länger auf ein stabiles Signal warten, was aus evolutionärer Sicht für die Reaktion auf Feinde sehr ungünstig gewesen wäre. Bei breiteren Frequenzgruppen ist dagegen die räumliche Auflösung des Schalls wesentlich schlechter, da eventuelle Obertöne die dafür nötige Auswertung der Phase erschweren [59].

Der auditorische Signalweg

Im *Spiralganglion* laufen alle mit den Haarzellen verbundenen Neuronen in den zentralen Hörnerv zusammen, den *Nervus vestibulocochlearis*. Dieser ist über das Stammhirn mit dem zentralen Nervensystem verbunden. Die Reizleitung und -verarbeitung verläuft entlang einer Hörbahn, die sich aus mindestens fünf hintereinander geschalteten Neuronen zusammensetzt. Abbildung 2.20 stellt den wesentlichen Verlauf des auditorischen Pfades in Form einer afferenten Hörbahn dar. Einmündungsknoten des Hörnervs sind die dorsalen und ventralen Cochleariskerne, *Nucleus cochlearis dorsalis und ventralis*, die im oberen Teil der *Medulla oblongata*, des verlängerten Rückenmarks, sitzen. Hier teilt sich die Hörbahn in mehrere Bahnen auf, wovon der größte Teil der Nervenfasern auf die kontralaterale Seite zu den Olivenkernen kreuzt. Hier werden Intensitäts- und Laufzeitunterschiede verglichen, welche für die Schallquellenlokalisierung und das Richtungshören bedeutsam sind. Von hier an wird der Hauptstrang des Hörnervs über die seitliche Schleifenbahn *Lemniscus lateralis* weiter zu den seitlichen Schleifenkernen im Pons geführt. Einige Fasern enden hier, die anderen laufen weiter zu der Vierhügelregion mit dem unteren und oberen Vierhügel. In diesem Bereich werden die sensorischen Informationen der Cochleariskerne mit den Rauminformationen der

oberen Olive verglichen. Die Hörbahn verläuft weiter über den Thalamus oder *Corpus geniculatum mediale* im Mittelhirn. Der Thalamus ist verbunden mit dem Hypothalamus, dem limbischen System und der Hörrinde. Zu den Aufgaben des Hypothalamus gehört unter anderem die Kontrolle der Hormonausschüttung, der vegetativen Reaktion und des Gefühlslebens. Das emotionale Erleben wiederum ist im limbischen System angesiedelt. Die Nervenleitungen enden schließlich in der primären Hörrinde in der *Heschleschen Querwindung* des Schläfenlappens, welche von sekundären Hörregionen umgeben sind. Diese Hörzentren dienen der Analyse komplexer Klänge, als Kurzzeitgedächtnis beim Tonvergleich wie auch dem bewussten Zuhören und vielem mehr. Hier finden dann die eigentlichen kognitiven Leistungen unter Beteiligung vieler verschiedener Hirnareale statt [177, 86, 59].

Neuronale Verarbeitung akustischer Signale

Besonders die Musikwahrnehmung ist ein sehr komplexer Prozess. Dazu gehören die akustische Analyse, das auditorische Gedächtnis, die Verarbeitung von Syntax und Semantik, der Einfluss von Emotionen, das autonome Nervensystem, das Hormonsystem, Immunsystem und motorische System. Es gibt verschiedene neuronale Antworten für die Tonhöhe, den Klang, die Rauigkeit und die Intensität [178].

Unzweifelhaft ist, dass beim Musikhören viele Gehirnareale gleichzeitig angesprochen werden. Abbildung 2.21 auf Seite 57 zeigt dies schematisch. In der linken Gehirnhälfte findet vor allem die Verarbeitung von Lautstärke, Klangfarbe, musikalischen Intervallen, Akkorden, Rhythmus, Takt, Tondauer und Tonhöhe statt. In der rechten Gehirnhälfte sind dagegen die Wahrnehmung von Tempoänderungen und der Ausdrucksmodalität von Tonhöhen angesiedelt [24]. Allerdings gibt es dabei geschlechts- und kulturspezifische Unterschiede [97]. Bei geübten Musikern sind noch weitere Hirnbereiche beteiligt, unter anderem solche, die für die Bewegungssteuerung zuständig sind. Dazu kommen die Verknüpfungen mit dem Sprachzentrum, dem Musikgedächtnis und mit dem Limbischen System.

Alle Verarbeitungsschritte in den verschiedenen Hirnarealen laufen permanent und weitgehend unbewusst ab. Aufgrund der progressiven Verarbeitung können Warnsignale jedoch äußerst schnell identifiziert werden [102].

Die genauen Mechanismen der neuronalen Verarbeitung von Schallereignissen insbesondere von Musik sind noch nicht vollständig geklärt, aber zunehmend Bestandteil

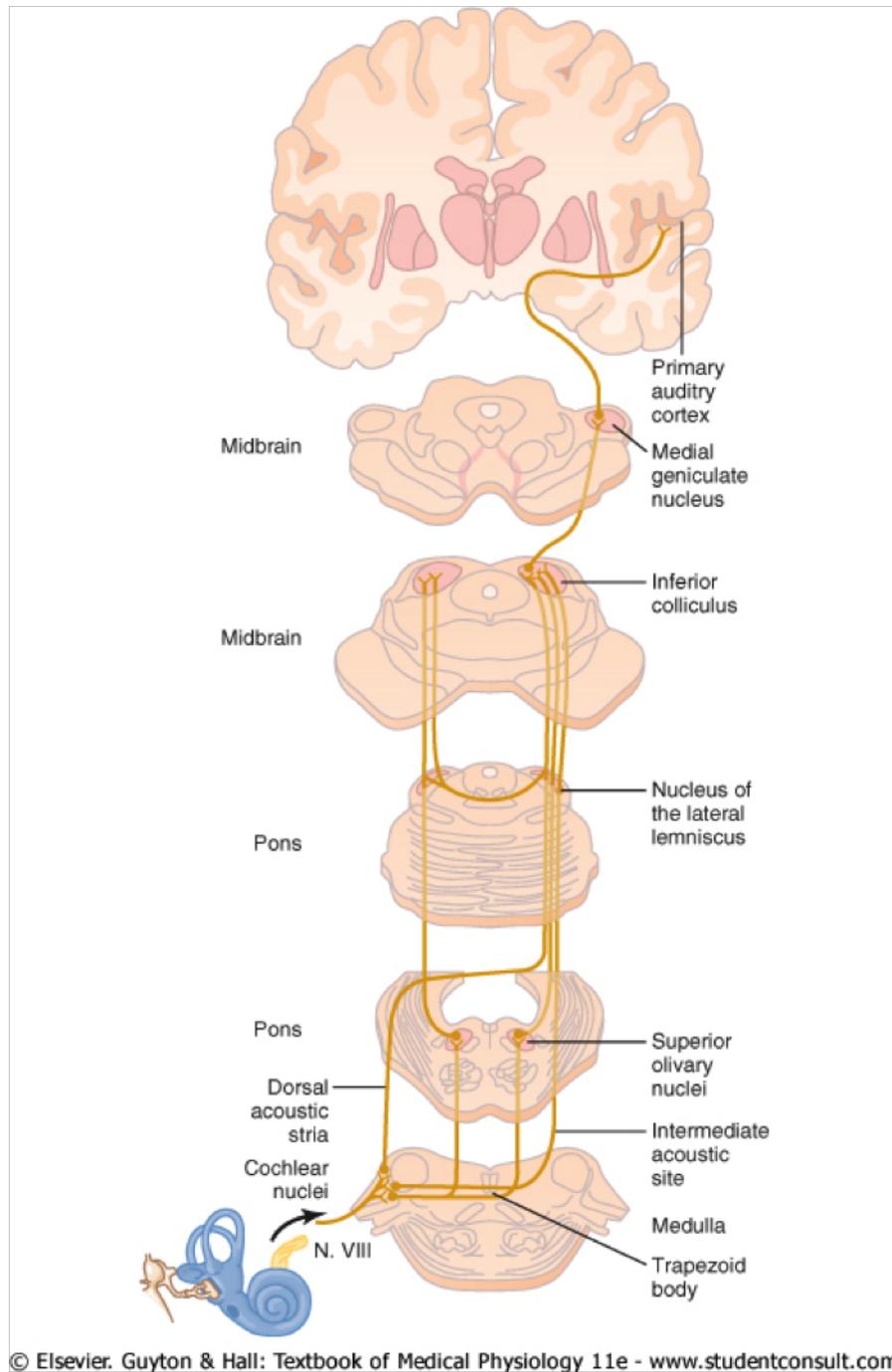


Abb. 2.20: Der auditorische Pfad der Reizleitung und -verarbeitung in vereinfachter Darstellung am Beispiel einer afferenten Hörbahn, entnommen aus [79].

aktueller Forschungsarbeiten [115, 102, 122]. Die weitere detaillierte Aufschlüsselung der Verarbeitungsprozesse würde einerseits den Umfang dieser Arbeit übersteigen und andererseits liegt darin ein großes methodisches Problem. Denn Musik ist ein ganzheitliches Gebilde, das seine Wirkung erst durch das Zusammenwirken aller Parameter entfaltet und einzelne Intervalle, Akkorde oder Rhythmen schlecht aus dem Kontext gelöst und isoliert auf ihre Wirkung hin untersucht werden können [72].

Wahrnehmung akustischer Signale

Eine Annäherung an die Frage, *wie* wir Reize wahrnehmen, bietet die Psychophysik. Sie beschreibt und untersucht die Zusammenhänge zwischen physikalischen (messbaren) Reizen und den von diesen ausgelösten Empfindungen. Dabei wird oft das Blackbox-Prinzip angewandt und die neuronale Verarbeitung ausgeklammert.

Der Teilbereich der Psychoakustik beschäftigt sich mit dem menschlichen Hörsinn und hat das Ziel, ein wahrnehmungsgerechtes Modell zu entwickeln und dabei die im Allgemeinen nichtlinearen Effekte in mathematischen Einheiten und somit vergleichbar abzubilden.

Alle psychoakustischen Größen wie Lautheit, Tonheit und Schärfe sind Empfindungsgrößen, also Größen, die nicht in einer absoluten Skala unmittelbar mit technischen Geräten gemessen werden können, sondern von Menschen subjektiv wahrgenommen werden.

Körperliche Reaktionen

An dem Punkt, wo der ankommende Schall in Impulse des Hörnervs umgewandelt wird und die neuronale Verarbeitung im Gehirn beginnt, nimmt die Kenntnisdichte ab und an einigen Stellen widersprechen sich die veröffentlichten Studien gar gegenseitig. Weitgehende Einigkeit besteht in der Annahme, dass die musikalischen Eigenschaften Lautstärke und Tempo unmittelbare physiologische Reaktionen hervorrufen können. Aber schon die Wirkung von Tonalität, Harmonik und Klangfarbe ist höchst umstritten: So werden in [193] Studien zitiert, die eine Stressreaktion von Föten im Mutterleib nach einer Beschallung mit dissonanter Musik gemessen haben wollen, während sich der Herzschlag nach Musik von Mozart oder Vivaldi entspannt haben soll. Und auch [155] will bei Untersuchungen mit einem Magnetspintomographen ähnliche Aktivitäten

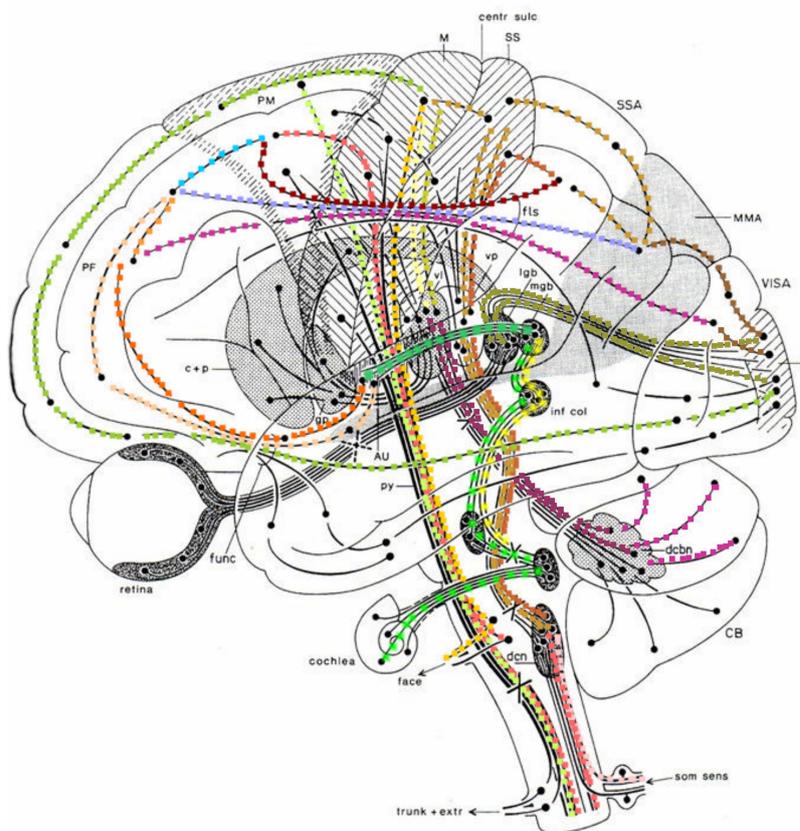


Abb. 2.21: Schematische Darstellung des großen sensorischen und motorischen Systems des menschlichen Gehirns. Einige Pfade im Zusammenhang mit dem kortikalen Assoziationssystem, der Basalganglien und dem Kleinhirn sind ebenfalls gezeigt.

AU: primary auditory cortex; c+p: caudate nucleus + putamen; CB: cerebellum; centr sulc: central sulcus; dcn: dorsal column nuclei; dcbn: deep cerebellar nuclei; extr: extremities; fis: fasciculus longitudinalis superior; func: fasciculus uncinatus; gp: globus pallidus; inf col: inferior colliculus; lgb: lateral geniculate body; M: primary motor cortex; MMA: multimodal association cortex; mgb: medial geniculate body; PE: prefrontal cortex; PM: premotor cortex; pca: posterior column nuclei, py: pyramidal tract; SS: primary somatosensory cortex; SSA: somatosensory association cortex; som sens: somatic sensibility; VIS: primary visual cortex; VISA: visual association cortex; vl: ventral lateral thalamic nucleus; vp: ventral posterior thalamic nucleus.

Modifiziert nach [146]

im Gehirn beobachtet haben. Somit müssten bestimmte Harmonien unmittelbare physiologische Effekte im Gehirn und möglicherweise auch im Organismus hervorrufen. Dagegen behauptet Gembris [71], dass musikalische Eigenschaften wie Harmonik oder Klangfarbe – etwa das Empfinden von Konsonanz und Dissonanz oder Dur- und Mollklängen – erst im Alter von drei bis fünf Jahren „erlernt“ werden. Das würde bedeuten, dass diese Parameter keine direkten physiologischen Effekte hervorrufen, sondern rein psychische Empfindung sind [72].

So treffen die akustischen Reize über die beschriebene unbewusste Verarbeitung – ob als direkte Reaktion auf musikalische Merkmale oder durch den Umweg über das Gefühlszentrum – auf das vegetative Nervensystem und können verschiedene physiologische Körperreaktionen hervorrufen, etwa eine Änderung des Blutdruckes, zumal auch die kreislaufregulierenden Bereiche in der Medulla oblongata und im Pons tangiert werden. Aus der Messung elektrophysiologischer Parameter kann auf eine sympathische oder eine parasympathische Tonuslage und somit auch auf Veränderungen des Blutdruckes rückgeschlossen werden.

2.1.2.2 Musik und ihre therapeutische Wirkung

Der Umgang mit Klängen und Musik ist so alt wie die Menschheit selbst. Die Funde einer Schwanenknochenflöte und einer Elfenbeinflöte des Tübinger Forscherteams um Nicholas J. Conard in Geißenklösterle auf der Schwäbischen Alb in 1995 belegen dies. Die Flöten entstanden vor etwa 35000 Jahren und sind der älteste Hinweis für Musik auf der Erde, denn sie sind gezielt als Musikinstrument hergestellt worden [42, 163]. Vermutlich hat damals die Wirkung von Klängen bereits eine Bedeutung gehabt. Spätestens die Griechen wussten über den Einfluss von Musik auf Körper und Geist.

Aristoteles (384–322 v. Chr.) sah in der Musik ein wichtiges Erziehungsmittel und Platon (427–347 v. Chr.) forderte von der Jugend sich drei Jahre lang dem Musikstudium zu widmen. Beide vertraten die antike Ethoslehre, d.h. Theorien über die Wirkungsweise von Tonarten und Instrumenten auf die Hörer. Pythagoras war einer der ersten, der die heilende Wirkung von Musik erwähnte [183, 73, 46]. Durch alle Zeitepochen, sei es im Mittelalter oder in der Affektenlehre aus dem Barock, wurden die wirkungsvollen und heilenden Kräfte der Musik für den Menschen zur Anwendung gebracht. Bereits

1880 veröffentlichte Johann Dogiel eine Arbeit, in der er den Einfluss von Musik auf den Blutkreislauf zu erklären versuchte [46]. Seit dem frühen 20. Jahrhundert nehmen die publizierten Arbeiten auf diesem Gebiet deutlich zu. In den letzten Jahrzehnten sind zahlreiche medizinische Studien zu den positiven Effekten therapeutischer Musik in diversen Settings besonders aber im klinischen Umfeld durchgeführt worden [183, 195]. Heute sind die aktive und passive Musiktherapie und die Musikmedizin ein anerkanntes Fachgebiet mit guten Heilungserfolgen für ein breites Spektrum an Krankheitsbildern [22].

Die Forschungsaktivitäten dieses sehr umfassenden Themas der Musikwirkung lassen sich in drei wesentliche Bereiche einteilen. Das erste Hauptgebiet ist das der Musikwahrnehmung und behandelt wie Individuen auf Musik reagieren. Das zweite wichtige Feld umfasst die Neurowissenschaften mit der hauptsächlichen Fragestellung nach der Lokalisation der Musikverarbeitung im Gehirn. Das dritte Gebiet untersucht die medizinischen Effekte von Musik sowie deren Anwendungsmöglichkeiten, meist im Rahmen klinischer Studien. Dabei spielen die Veränderungen der Vitalparameter eine große Rolle.

Musikwahrnehmung

Untersuchungen zur Musikwahrnehmung haben seit den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts deutlich zugenommen. Häufige Fragestellungen sind die:

- Wahrnehmung von Tönen,
- Interpretation der für die Musik relevanten akustischen Informationen,
- Emotionale Reaktionen auf Musik.

Daran beteiligt sind ebenso die Disziplinen Psychoakustik, Neuropsychologie und Psychologie [40]. Neben vielen anderen Studien berichten Gabrielsson und Lindström [68] in einer Meta-Analyse von Korrelationen zwischen musikalischen Eigenschaften (z.B. Tonart, Tempo, Tonhöhe, Lautstärke, Intervalle, Melodie, Harmonie) und Emotionen (z.B. Freude, Traurigkeit, Ärger, Angst). „Freude“ beispielsweise wird musikalisch durch eine hohe Lautstärke, klare Harmonien, Staccato, helle Klangfarbe und ein schnelles Tempo ausgedrückt. „Traurigkeit“ dagegen wird durch langsame Tempi, Molltonarten, geringe Tonhöhe und Lautstärke, Dissonanzen, Legato und dunkle

Klangfarben charakterisiert [77]. In weiteren zahlreichen Studien [101, 172] wurde gezeigt, dass psychologische wie auch physiologische Reaktionen auf Musik von der psychophysiologischen Ausgangssituation, neben noch weiteren Faktoren, des Hörers abhängig sind.

Weitere Bestandteile vieler Arbeiten sind Untersuchungen zur Tonhöhe, Klangfarbe, der zeitlichen Struktur von Musik sowie zu Musik und Sprache, Spezialisierungen des musikalischen Gehirns, Musikwahrnehmung und Gedächtnis und zur Verarbeitung von musikalischer Bedeutung wie von musikalischen Strukturen.

Hervorhebenswert ist das neurokognitive Modell der Musikperzeption in Abbildung 2.22 von Stefan Kölsch [103]. Es stellt alle wesentlichen Aspekte dar, die bei der Wahrnehmung von Musik berührt werden.

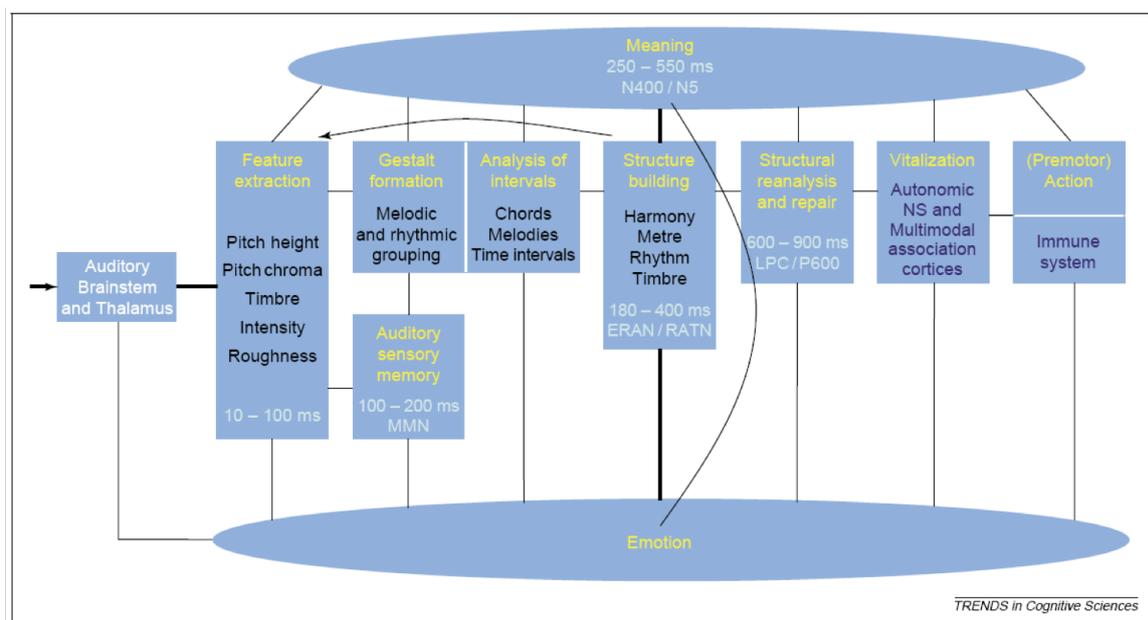


Abb. 2.22: Das neurokognitive Modell der Musikperzeption, entnommen aus [103]

Der rasche Interessens- und Wissenszuwachs bezüglich der neuronalen Prozesse und die funktionale Organisation des Hirns im Zusammenhang mit Musik ist erst durch den Einsatz moderner bildgebender Verfahren wie das MEG und EEG für die elektro-physiologischen Veränderungen sowie das PET, MRT und fMRT für hämodynamische Prozesse möglich geworden [152, 64]. Gegenstand der meisten Studien war die:

- Lokalisierung von Hirnaktivitäten,
- Bestimmung von Dominanzen bestimmter Hirnhälften,

- Bestimmung von Alarm- und Aufmerksamkeitszuständen,
- Untersuchung emotionaler Reaktionen,
- Feststellung von Unterschieden zwischen Musikern und Nicht-Musikern,
- Untersuchung spezifischer musikalischer Teilaspekte wie Rhythmus, Melodie, Klang usw.,
- das Verstehen von musikalischen Lernprozessen.

Diese Erkenntnisse geben Hinweise auf die Wirkungsweise von Musik und die für die Wirkung verantwortlichen Parameter und sind somit bei der späteren Musikanalyse für die Ermittlung der therapeutischen Interventionssequenzen von Bedeutung, siehe Kapitel 5.2.1.

Therapeutische Effekte

Medizinische Untersuchungen und klinische Studien in Verbindung mit Musik und deren Auswirkungen auf die Patienten sind sehr geläufig und seit dem frühen 20. Jahrhundert von großem Interesse [194, 95, 183]. Die am häufigsten untersuchten Effekte von Musik sind:

- kardiovaskuläre Veränderungen,
- Veränderungen der Atemrate,
- hormonelle Veränderungen,
- psychische Verfassung,
- Reduktion von Angst und Stress,
- Heilungsprozesse.

Nahezu alle zentralnervös und psychosomatisch verursachten oder verhaltensbedingten Störungen kommen für die Behandlung mit Musik in Betracht. Spintge nennt unter anderem die Schmerztherapie, die Entgiftung von Alkohol und Drogen, sowie Depression, Koma, Stress, Herzerkrankungen, geriatrische Erkrankungen wie auch Alzheimer und die Physiotherapie [182]. Da gerade in der Intensivmedizin viele angstausslösende

Momente und schmerzbehaftete Situationen existieren, sind in diesem Bereich viele Studien durchgeführt worden [138, 23, 41, 195, 70]. Es wurde eindeutig eine Reduktion der verabreichten Anästhetika oder Schmerzmittel nachgewiesen, wenn der Patient die Möglichkeit des Musikhörens hatte. Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass der Blutdruck sank, sich die Herz- und Atemrate verringerte, sowie weniger Stresshormone ausgeschüttet wurden.

Musik ist somit sehr gut als angstlösendes (anxiolytische Musik) und schmerzlösendes Therapeutikum, gegen Stress beispielsweise präoperativ, bei der Unterstützung postoperativer Heilungsprozesse und während chirurgischer Eingriffe geeignet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Anwendung von Musik speziell zur Behandlung der primären Hypertonie prädestiniert ist, da sie eine hohe verstärkende Wirkung auf die

- Entspannungsförderung,
- Stressreduktion,
- Harmonisierung Körper und Geist,
- Förderung von Emotionen,
- Anregung kognitiver Leistungen und Fähigkeiten.

hat, insbesondere in der Kombination mit Entspannungstechniken.

2.1.2.3 Bedeutung von Biofeedback

Ohne Feedback sind weder technische noch biologische komplexe Systeme regel- und steuerbar. Dies gilt ebenso für die Verhaltensentwicklung des Menschen. Nur mit Rückmeldung und Reflexion des eigenen Verhaltens ist ein Lern- und Veränderungsprozess möglich. Biofeedback hat das Ziel, dem Anwender durch die Rückmeldung elektrophysiologischer Signale die Veränderung körperlicher Funktionen zu ermöglichen und somit eine höhere Selbstkontrolle zu erlangen. Die rückgemeldete Information soll dabei positiv verstärkend wirken und möglichst sofort und eindeutig erfolgen. Dazu sind entsprechende lern- und motivationspsychologische Aspekte einzuhalten [164]. Das Feedback erfolgt im Allgemeinen kontinuierlich in akustischer oder optischer Form. Die Anwendung von Biofeedback erstreckt sich nahezu auf den gesamten Bereich psychosomatischer Indikationen und zentralnervös verursachter Regulationsstörungen. Nach

der Literaturrecherche von Martin gehört die Hypertonie mit 6 % aller 2044 Studien im Zeitraum von 1972 bis 2006 zu den am häufigsten evaluierten Indikationen [125]. In Publikationen über oder im Zusammenhang mit Biofeedback werden folgende Aspekte immer wieder als sehr bedeutsam hervorgehoben [164, 173, 158, 143, 134, 141, 110]:

- Rückmeldung von dem Bewusstsein sonst unzugänglichen körperlichen Werten,
- Entwicklung eines Gefühls für sich selbst und den eigenen Körper,
- Erkennen und Verstehen der Zusammenhänge von gesundheitlichen Störungen oder Befindlichkeiten und dem eigenen Verhalten bzw. der Lebensweise,
- Anstoßen von Veränderungs- und Lernprozessen,
- Anleitung und Vermittlung geeigneter Coping-Strategien bei Stress oder in kritischen Situationen,
- Steigerung der Motivation bei der Durchführung von Verhaltensänderungen,
- aktive Einbindung des Patienten in den Therapieprozess, und
- daraus erwachsende Eigenverantwortung.

Aus Untersuchungen zu Entspannungsverfahren als klinisch psychologische Behandlungsmethode der Hypertonie gehen bestimmte Methoden als besonders effektiv hervor [60]. Diese zeichnen sich durch eine autoinstruktive und passive Entspannungsinduktion mit einer deutlich vorhandenen somatischen Entspannungreaktion aus. Musik, insbesondere das rezeptive Musikhören kann dieser Kategorie zugeordnet werden und gehört demnach zu den wirksamen Behandlungsmethoden bei Hypertonie. Musik bietet ein enorm hohes therapeutisches Potential mit guten Chancen für eine erhöhte Therapieakzeptanz und der damit verbundenen verbesserten Compliance der Patienten. Gerade bei der stressinduzierten Hypertonie ist die telemedizinisch gestützte akustische Biofeedback-Therapie indiziert. Sie vereint die jeweils für sich betrachteten sehr effektiven Methoden und verspricht einige offene Probleme zu lösen, die sonst dem Therapieerfolg entgegen stehen.

2.2 Bedeutung einer Virtual Lab-Struktur für die Entwicklung telematischer Feedback-Therapien

Wie bereits erläutert hängt der Blutdruck als systemische Größe sehr stark von psychophysischen Einflüssen ab. Daher liegt der Ansatz nahe, die experimentelle Umgebung sowohl zu standardisieren als auch authentisch zu gestalten. Es ist ebenfalls schon lange bekannt, dass die Blutdruckmessung in der ärztlichen Praxis die personenbezogene Situation nicht richtig wiedergibt. Die häufigsten Effekte, die zu einer Fehleinschätzung des Blutdrucks führen, sind die Praxishypertonie, auch als Weisskitteleffekt bekannt, und die Praxisnormotonie [58, 134, 200]. Diese Tatsache ist nicht nur für die Entwicklung physikalischer Therapiestrategien sondern auch für medikamentöse Interventionen von Bedeutung. Ein virtuelles Labor, das so genannte *Virtual Lab* gestattet die Datenerhebung unter reproduzierbaren und authentischen Bedingungen sowie die zeitgleiche Analyse einer genügend großen Anzahl von Probanden. Das Virtual Lab ist in Abbildung 2.23 dargestellt und wie folgt definiert:

Virtual Lab bedeutet die Ermittlung patientenspezifischer, indikationsbezogener, systemischer, physiologischer Parameter mittels telemedizinischen sensorgestützten Erhebungsverfahren in authentischer Umgebung. Aus den gesammelten Daten werden in Verbindung mit vorhandenen oder noch zu erfragenden patientenbezogenen Informationen qualifizierte Diagnosen ermittelt und daraus individualisierte Therapieempfehlungen abgeleitet und dem Patienten rückgemeldet. Die Feedbackübermittlung wird bei Bedarf mit für eine Intervention erforderlichem therapeutischen Material in elektronischer Form versehen.

Mit virtuellen Laboren lassen sich u.a. zuverlässig Daten ermitteln, die Hinweise auf regelungsassoziierte Therapiemaßnahmen erlauben. Abgesehen von der originären Ansprechrate ist der Erfolg einer regelungsbasierten physikalischen Therapie von der Akzeptanz der Patienten abhängig. Mit einem virtuellen Labor kann gezeigt werden, ob die mangelnde Effizienz einer Therapiestrategie an der mangelnden Compliance der Patienten oder an der ungenügenden Wirksamkeit der Strategie liegt. Es kann ebenfalls bei der Schließung von Informationslücken seitens des Arztes helfen. Nur ein geringer Teil der Ärzte hat einen Überblick über die Behandlungsqualität in ihrer Praxis. Die meisten kennen nicht den Anteil der kontrolliert eingestellten der von ihnen behandelten Hypertoniker. Von den 76 % Patienten, die nach Ansicht der Ärzte den Zielblutdruck erreicht haben, sind es tatsächlich nur 37 % [134, 94].

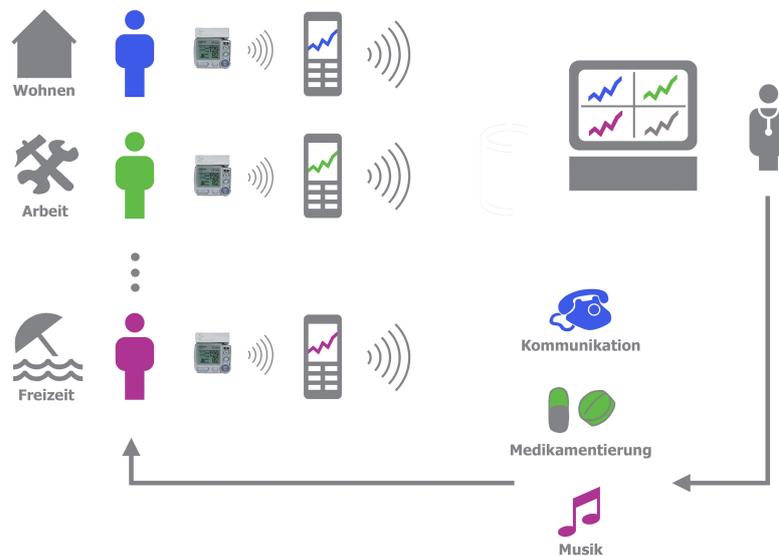
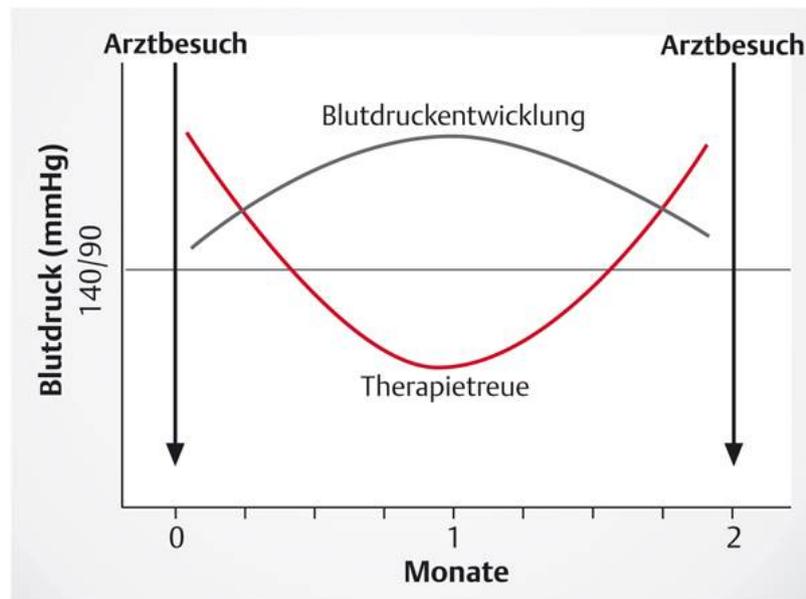


Abb. 2.23: Das Virtual Lab

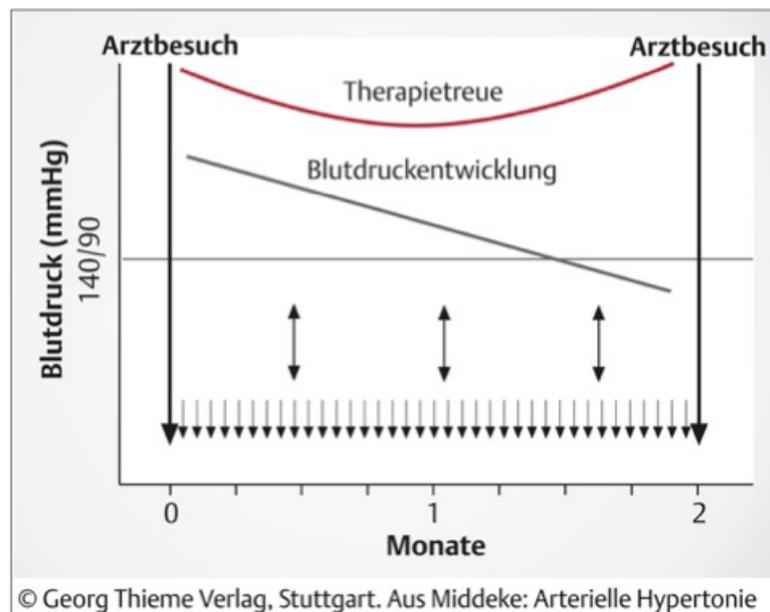
Pickering [156] und Mengden [130] beschreiben das telemedizinische Management der Hypertonie als „Virtuelle Hypertonieklinik“ und ist in Abbildung 2.24 mit dem potentiellen Effekt auf die Compliance und das Blutdruckniveau dargestellt. Der behandelnde Arzt kann die Therapie begleiten, führen und entsprechend den individuellen Reaktionen sofort intervenieren. Dadurch ist das Virtual Lab neben der Unterstützung bei der medizinischen Versorgung auch eine geeignete Entwicklungsumgebung für neue Therapeutika sowie für die Durchführung klinischer Studien zur Erforschung spezifischer Wirkmuster und -reaktionen. Eine weitere, nicht zu vernachlässigende, wichtige Komponente des Virtual Lab ist zum einen die Möglichkeit der Therapiebegleitung über Entfernungen hinweg und zum anderen für die Prävention, der postklinischen Versorgung wie auch für die Rehabilitation.

Das fünfstufige Modell und Schema der Verhaltensänderungen nach dem transtheoretischen Modell von Prochaska und DiClemente [162] ist sehr gut auf die Behandlung von Hypertonikern übertragbar [134]. Die darin vorgesehenen Aufgaben des Arztes sind mit dem Virtual Lab sehr leicht und komfortabel umsetzbar. Dazu gehört in der Stufe,

1. der *Sorglosigkeit*, dem Patienten umfassende Informationen zur Hypertonie, zum Risiko und den Behandlungsoptionen geben,



© Georg Thieme Verlag, Stuttgart. Aus Middeke: Arterielle Hypertonie
 (a) Traditionelles Konzept der Blutdrucküberwachung [130].



© Georg Thieme Verlag, Stuttgart. Aus Middeke: Arterielle Hypertonie
 (b) Telemedizinisches Konzept zur Blutdrucküberwachung mit regelmäßigen Kontakten zwischen den Arztbesuchen [130].

Abb. 2.24: Traditionelles und telemedizinisches Konzept zur Blutdrucküberwachung, entnommen aus [134].

2. der *Bewusstwerdung*, mit dem Patienten über seine Vorstellungen bzgl. Aufwand, Kosten und Nutzen möglicher Verhaltensänderungen sprechen,
3. der *Vorbereitung*, dem Patienten noch konkretere Informationen über die Behandlungsmöglichkeiten geben und individuelle Ziele mit Prioritäten auswählen,
4. der *Handlung*, nachfragen und positive Verstärkung geben,
5. der *Aufrechterhaltung*, regelmäßige Nachfrage, Ansprache von Schwierigkeiten und Erfolge rückmelden.

Unterstützt wird die Behandlung von einer guten Informations- und Kommunikationspolitik zwischen Arzt und Patient und sollte dem Modell des „shared decision making“ nahe kommen [134]. Die Biofeedback-Therapeuten haben nahezu die gleichen Forderungen an ein gutes und erfolgreiches Therapiemanagement. Neben dem Monitoring der Blutdruckwerte empfehlen sie das Führen eines Tagebuches, regelmäßiges Üben, Follow Ups und in größeren Abständen eine Nachschulung [127]. Auch diese Punkte können mit dem Virtual Lab gerade in Verbindung mit den Möglichkeiten der neuesten modernen Kommunikationstechniken qualitativ hochwertig umgesetzt werden.

Das Virtual Lab ermöglicht die exakte Untersuchung von folgenden Einflüssen:

- ortsabhängige, räumliche oder umweltbezogene Effekte, Wirkungen und Folgen,
- ereignisabhängige Reaktionen und Wirkungen,
- zeitabhängige und zeitgesteuerte Reaktionen und Wirkungen,
- chronobiologische Effekte und Therapie,
- zirkadian abhängige Effekte, da individuelle Zyklen erkannt und berücksichtigt werden können,
- selbstbestimmte und/oder fremdbestimmte aktivitätsabhängige Reaktionen,
- sowie die Begleitung, das Management und Coaching von therapielevanten Veränderungsprozessen.

Am Beispiel der akustischen Biofeedback-Therapie des systemischen Bluthochdruckes soll im Folgenden gezeigt werden, wie unter Einsatz von virtuellen Laboren die Studien präzisiert werden können und welche Anforderungen zu stellen sind.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung und Technik aller Teilgebiete dargestellt, die für die Entwicklung einer akustischen Biofeedback-Therapie im Rahmen eines *Virtual Lab* relevant sind.

Die Analyse fokussiert auf den konkreten Einsatz bei Hypertonie und umfasst im Wesentlichen:

- Systeme und Komponenten zur telemedizinischen Diagnostik und Intervention
- die dazugehörige biomedizinische Sensorik zur Erfassung diverser Vitalparameter
- eine Betrachtung der Möglichkeiten moderner Informations- und Kommunikationssysteme vor allem zur interaktiven Dialogführung und der Realisierung von Feedback, sowie
- eine Standortbestimmung im Bereich der therapeutischen Nutzung von Biofeedback und Musik

Zunächst folgt ein kurzer Abriss über die Entwicklung von Informations- und Kommunikationssystemen unter dem Blickwinkel (tele-)medizinischer Anwendungen.

3.1 Die Evolution der Kommunikationstechnik

Telemetrie bedeutet die Fernmessung mittels eines Sensors und der Messdatenübertragung. Einer der ersten drahtlosen Mikrosender zur Messung der Atemfrequenz an Säuglingen ist bereits Mitte der siebziger Jahre entstanden [204]. Die erweiterte Form der Telemetrie sieht die Fernsteuerung vor, sofern am Messort eine Aktorik vorhanden ist.

Telematik ist die Verbindung der Telekommunikation und der Informatik. Es wird auch oft von Gesundheitstelematik oder Telemedizin gesprochen. In den Anfängen der Telemedizin wurden im Allgemeinen die Videokommunikation und Teleoperationen damit in Verbindung gebracht.

Erst heute, nach dem rasanten Fortschritt der Internet- und Kommunikationstechnologie und dem hohen Verbreitungsgrad von Mobiltelefonen mit all den damit verbundenen Möglichkeiten ist die Telemedizin komfortabel umsetzbar und nutzbar. Auch die enorme Leistungssteigerung bei gleichzeitiger Miniaturisierung der elektronischen Bauelemente und der Halbleitertechnologie, gemäß dem Moore'schen Gesetz, ermöglicht kleine, smarte Sensoren sowie mobile Endgeräte, die bei einem guten und sicheren Telemonitoring erforderlich sind, siehe Abbildung 3.1 und 3.2.

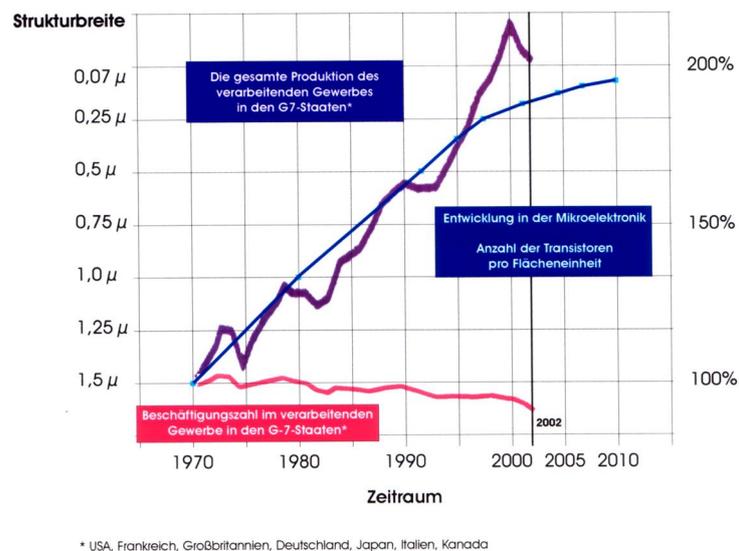


Abb. 3.1: Effizienzsteigerung durch Mikroelektronik, entnommen aus [207].

Der Mitte der neunziger Jahre begonnene Konvergenzprozess der Sprach- und Datenetze ist weitestgehend vollzogen. Parallel dazu haben sich zahlreiche Applikationen und Anwendungsgebiete entwickelt. Die gesamte Branche unterliegt nach wie vor einem steten Wandel.

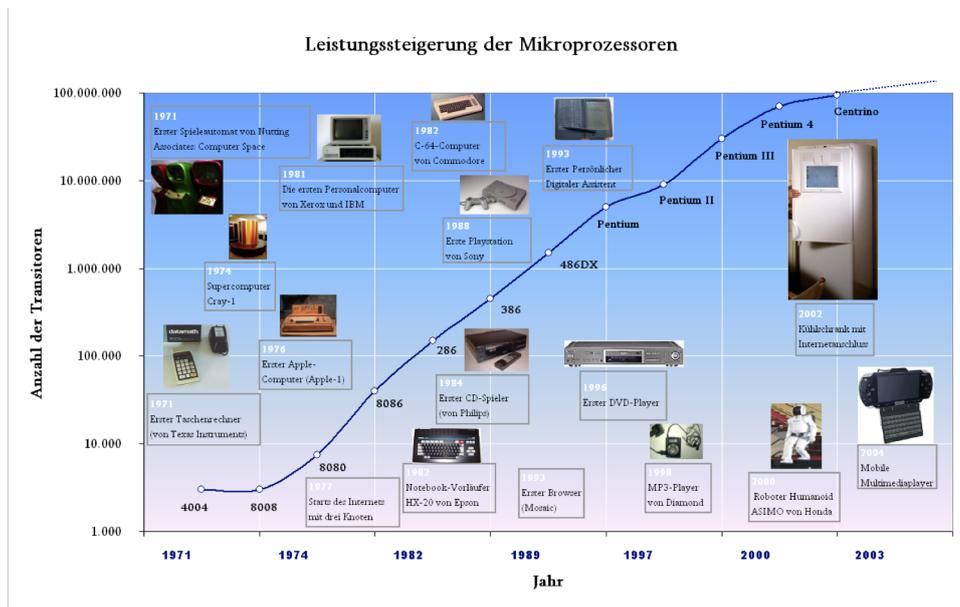


Abb. 3.2: Meilensteine der Elektronikentwicklung, entnommen aus [208].

Die folgende Auflistung stellt die wichtigsten Entwicklungen dar:

Sprach- und Datennetze:

Analog → ISDN → Internet → IP-Networking → VoIP → Skype → Mobilfunk → WLAN → Voice over WLAN → Web 2.0 → Internet der Dinge → Social Communities → ...

Funkstandards:

Nahfeld: DECT → WLAN → ZigBee → Bluetooth → NFC → Low Energy Bluetooth → ...

Fernfeld: D-Netz → GSM → GPRS → UMTS → EDGE → ADSL → HSDPA → ...

Multimedia-Applikationen:

Festnetztelefon → Mobilfunktelefon → integrierter Audioplayer → integrierte Kamera → Videokonferenz → Triple Play → Radio und TV auf mobilen Endgeräten → Streaming-Lösungen → ...

Informationsdienste:

Rundfunk: terrestrischer Rundfunk mit MW, LW, KW, UKW → digitaler Rundfunk DAB via Satellit, terrestrisch und Kabel → Internet-Radio → mobiles Radio → Streaming-Lösungen →...

Fernsehen: terrestrisches Fernsehen → digitales Fernsehen DVB-T, DVB-S, DVB-C → IP-TV → mobiles Fernsehen → Streaming-Lösungen → ...

Suchmaschinen: Google → Meta-Suchmaschinen → Information Retrieval Verfahren → Informationsportale → ...

Diese Entwicklungen haben das Nutzerverhalten entscheidend geprägt und es wird von der „Always on-Gesellschaft“ gesprochen.

3.2 Aktueller Stand der Telemedizin

Dieses Kapitel soll eine Übersicht über den aktuellen Stand der Technik der biomedizinischen Sensorik für telemedizinische Diagnostik und Intervention darstellen und analysiert deren Stärken und Schwächen. Fokus sind kardiologische Erkrankungen, speziell die arterielle Hypertonie und damit im direkten Zusammenhang stehende Folgeerscheinungen bzw. weitere Krankheitsbilder wie beispielsweise Diabetes mellitus, Schlaganfall, Adipositas oder das metabolisches Syndrom.

Abbildung 1.3 auf Seite 6 zeigt einen umfassenden Systemüberblick mit den möglichen Teilkomponenten eines gesamten telemedizinischen Versorgungssystems. Die grundsätzlichen Funktionsprinzipien der sensorgestützten Telemedizin werden im folgenden exemplarisch erläutert.

3.2.1 Telemonitoring-Komponenten

Alle Telemonitoring-Systeme sind grundsätzlich in zwei Systemkonzepte einteilbar. Diese sind das:

Zentrale System: dieses Konzept ist im Allgemeinen als *Body Area Network (BAN)* bekannt. Die körpernah getragenen Sensoren übermitteln die Messwerte an eine zentrale Basisstation, die den Transfer der Daten in das Weitverkehrsnetz (WAN) zur Zielstation übernimmt. Die Basisstation ist das Gateway.

Dezentrale System: dieses Konzept funktioniert nach dem Prinzip der *Direktübertragung*. Jeder Sensor ist über eine Funkschnittstelle direkt an ein Endgerät gekoppelt und überträgt nach jeder Messung die Messwerte sofort an das Endgerät, welches die Daten bei Netzzugang ohne Verzögerung in das WLAN zum Ziel weiterleitet. Als Gateway fungiert ebenfalls das Endgerät. Dafür kommen viele Arten wie ein Modem, Mobiltelefon oder ein PDA bzw. Smartphone in Betracht.

Vor- und Nachteile der beiden Systemkonzepte:

Der Vorteil des zentralen BAN-Konzeptes ist die Möglichkeit beliebige Schnittstellen und somit Sensoren an das Gateway anschließen zu können. Die Daten werden über eine zentrale Ausgangsleitung hinausgeschickt. Für die WAN-Anbindung stehen alle verfügbaren analogen oder digitalen Übertragungsverfahren wie a/b, ISDN, DSL, GSM, UMTS usw. zur Verfügung.

Dagegen ist das dezentrale Konzept etwas aufwendiger, da jeder Sensor direkt an das verwendete Endgerät angebunden werden muss und demnach möglichst mit der gleichen Funkschnittstelle arbeiten sollte wie z.B. Bluetooth. Um die Nutzer je Indikation individuell ausstatten zu können, sollte die vollständige Produktpalette technisch einheitlich ausgerüstet werden. Wird ein Mobiltelefon als Gateway verwendet, ist zur Zeit Bluetooth die geeignete Wahl.

Der große Vorteil der dezentralen Lösung mit direkter Anbindung an das Endgerät ist deren Flexibilität und Mobilität. Da einerseits die Messgeräte mit der Sensorik wie auch die Endgeräte sehr klein und tragbar sind, können diese von den Nutzern bei Bedarf leicht ständig mitgeführt werden. Das Monitoring ist somit unabhängig von einer Basisstation, also orts- und zeitunabhängig. Durch die zentrale Basisstation bei dem BAN-Prinzip ist die Messwertübertragung dort ortsgebunden. Nur wenn ein Messwertespeicher in der Sensorik vorhanden ist, können die Messwerte zeitverzögert nach der Rückkehr zum Ort der Basisstation übertragen werden. Dieses erfordert zudem bewusste und manuelle Handlungen des Nutzers.

Beim BAN-Prinzip beschränken sich die Möglichkeiten für Feedback und Interventionen bei auf den klassischen telefonischen Übertragungsweg. Nur in wenigen Fällen, wie mit dem RTX3370 Telehealth Monitor [1] kann die Basisstation direkt angesprochen werden. Durch ein integriertes Audiointerface und einer Text-to-Speech-Lösung ist eine

Interaktion im beschränkten Umfang möglich. Der Einsatz ist jedoch nur bei Anwesenheit des Nutzers sinnvoll. Dagegen ermöglicht die dezentrale Lösung bei Verwendung von Mobiltelefonen ein Feedback in Echtzeit inklusive einer uneingeschränkten Dialogführung. Bei Bedarf ist unabhängig vom Aufenthaltsort des Nutzers eine Kontaktaufnahme über diverse Kanäle sowie die Einleitung einer Intervention möglich. Die Kommunikationswege können Sprache, SMS, MMS, E-Mail oder die direkte Internetverbindung sein.

Zunächst werden die verfügbaren Messgeräte unabhängig vom Systemkonzept untersucht. Es wird vor allem die Integrationsfähigkeit der verschiedenen Komponenten in ein telemedizinisches Gesamtsystem wie das *Virtual Lab* betrachtet. Von geringerer Bedeutung ist an dieser Stelle die eigentliche Sensortechnik.

Zur Ermittlung aller wesentlichen Vitalparameter existiert eine Vielzahl verfügbarer Messgeräte der unterschiedlichsten Ausprägung bzgl. Qualität, Leistungsumfang, Komfort und Preis. Es werden im Folgenden primär die Messgeräte betrachtet, die für den Home Care-Bereich ausgelegt sind, d.h. für die Selbstmessung und Selbstkontrolle, und eine kabelgebundene oder kabellose Schnittstellenanbindung an den PC und/oder ein mobiles Endgerät haben.

Weiterhin ist die Realisierung von Feedback, Intervention sowie Personalisierung und Individualisierung mit den Messgeräten und Systemen für das *Virtual Lab* von wesentlicher Bedeutung. Darum werden diese Aspekte ebenfalls mit hohem Augenmerk untersucht.

3.2.1.1 Produkte

Blutdruckmessgeräte:

Blutdruckmessgeräte haben für die Diagnose und Therapie der Hypertonie und Herz-Kreislauf-Erkrankungen die höchste Bedeutung. Die regelmäßig durchgeführte Blutdruck-Kontrolle, möglichst auch die Selbstkontrolle durch Blutdruckselbstmessung, ist essentiell und medizinisch anerkannt. Für diesen Zweck sind die vielfältigsten Messgeräte verfügbar.

Die Bestimmung des Blutdrucks erfolgt durch verschiedene Messverfahren und nach verschiedenen Prinzipien. Zunächst ist zwischen der kontinuierlichen und der punktuellen Blutdruckmessung zu unterscheiden. Die kontinuierliche Blutdruck-Messung

erfolgt invasiv und ist mit etlichen Risiken behaftet. Alternativ kann der Blutdruck kontinuierlich nichtinvasiv erhoben werden. Dazu ist ein erheblicher und sehr teurer Apparateaufwand nötig. Diese Methode ist nicht für die Selbstmessung geeignet. Sie kann nur durch medizinisches Fachpersonal durchgeführt werden.

Für die manuelle Messung gibt es ausreichend Geräte. Im professionellen Bereich werden die Sphygnomanometer bevorzugt.

Für die automatische Messung sind ebenfalls mehrere Methoden zu unterscheiden: Die ambulante 24 Stunden–Blutdruckmessung (ABPM), ist für die Erstellung eines Tag-Nacht-Profiles etabliert und gängige Praxis. Für den großen Home Care-Bereich sind Geräte nach der oszillometrischen Messmethode am weitesten verbreitet. Diese Geräte gliedern sich in Oberarm- und Handgelenkmessgeräte und sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.



(a) Oberarmmessgerät mit PC-Anbindung über USB von bosco [17]



(b) Handgelenkmessgerät mit PC-Anbindung über USB von bosco [17]



(c) Oberarmmessgerät mit USB-Anschluss von Omron [15]



(d) Handgelenkmessgerät von Omron [16]

Abb. 3.3: Beispiele diverser Blutdruckmessgeräte zur Blutdruckselbstmessung verschiedener Hersteller.

Die Messgeräte von Omron weisen zwei Besonderheiten auf. Zum einen haben sie einen Positionierungssensor integriert, der eine korrekte Messung auf Herzhöhe garantiert. Zum anderen sind sie mit der sogenannten IntelliSense-Technologie ausgestattet. Dies bewirkt ein personalisiertes Aufpumpen und soll die kürzest mögliche Messzeit realisieren. Für besonders druckempfindliche Patienten ist das sehr hilfreich. Das Oberarm-Messgerät wird für die Verwendung von Studien empfohlen.



(a) Handgelenkmessgerät von Omron mit Bluetooth-Übertragung auf das Handy über eine aufgesetzte Kommunikationseinheit

(b) Handgelenkmessgerät von Biocomfort mit integriertem Bluetooth-Modul

Abb. 3.4: Blutdruckmessgeräte mit Bluetooth-Übertragung zur Selbstmessung realisiert von der Sensor GmbH [10].



(a) Oberarmmessgerät mit Bluetooth von A&D [2]

(b) Handgelenkmessgerät HPL 208 mit Bluetooth von Mytech [5]

Abb. 3.5: Weitere verfügbare Blutdruckmessgeräte mit Bluetooth-Übertragung zur Selbstmessung.

Resümee:

Nahezu alle Hersteller von Blutdruckmessgeräten bieten Oberarm- und Handgelenkmessgeräte mit Anbindung an einen PC oder ein Mobiltelefon an. Die Schnittstellen variieren von serieller oder USB-Kabelverbindung oder schnurlos per Infrarot, bis Zig-Bee oder Bluetooth. Gleichzeitig bieten sie dann auch eine PC-Auswertesoftware an.

Personalisierung: Teilweise sind die Geräte multiuserfähig, d.h. sie können von mehreren Personen benutzt werden. Meistens sind mehrere Alarmer einstellbar, gedacht als Erinnerungsfunktion zur Medikamenteneinnahme oder an den Messzeitpunkt. In Einzelfällen, z. B. bei Mytech, wird automatisch bei Überschreitung vordefinierter Grenzwerte ein SMS-Alarm an eine hinterlegte Rufnummer übermittelt.

Intervention: Besonders erwähnenswert ist die Möglichkeit bei dem Gerät von Mytech von extern per SMS auf das Blutdruck-Messgerät steuernd zuzugreifen um eine Blutdruckmessung remote anzustoßen.

EKG - Elektrokardiogramm:

Da die nicht behandelte Hypertonie enorme Spätschäden zur Folge haben kann, ist deren Entdeckung und Behandlung sehr wichtig. Das EKG ist das Diagnoseverfahren erster Wahl bei allen kardialen Erkrankungen und in der kardialen Elektrophysiologie, der Goldstandard.

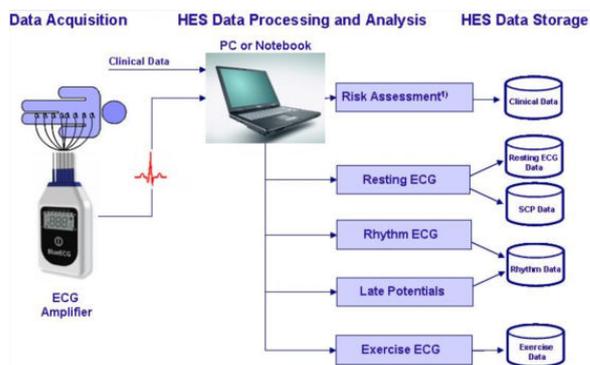
Der überwiegende Einsatz erfolgt im professionellen Bereich, aber es sind zunehmend Geräte für den Home Care-Bereich, d.h. für die Selbstkontrolle, verfügbar. Typische Messgeräte sind:

- Ambulantes 24h EKG
- Loop Recorder
- Cardio Net
- Transtelephonic Transmitter

Es existiert ein sehr großes Angebot am Markt. Darum werden hier nur einige EKG-Geräte für die Selbstkontrolle und mit Anbindung an einen PC oder ein Servicezentrum in den folgenden Abbildungen exemplarisch gezeigt ohne Anspruch auf Vollständigkeit.



(a) 12-Kanal EKG von Corscience mit Bluetooth-Schnittstelle

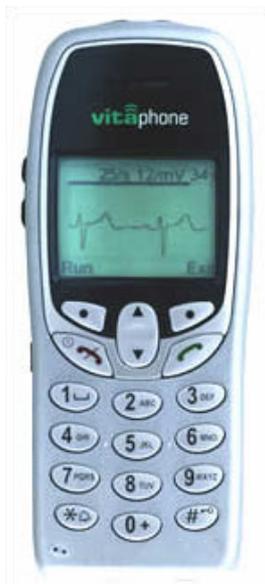


(b) Datenweiterleitungsprozess bei Corscience

Abb. 3.6: EKG-Gerät mit Anbindung an ein Daten Center von Corscience [3].



(a) 3-Kanal EKG Loop Recorder, Vita-phone 3300 Bt



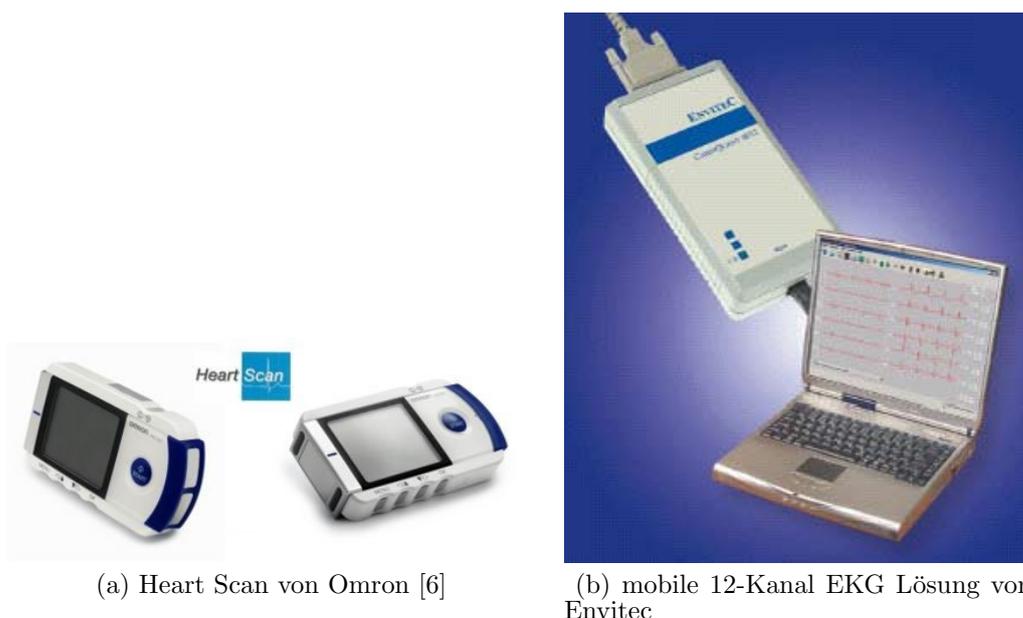
(b) Herzhandy Vita-phone 2300



(c) Servicekonzept von Vitaphone

Abb. 3.7: EKG-Geräte und das Servicekonzept von Vitaphone [7].

Bei EKG Geräten gibt es viele mobile Varianten für den Home Care-Bereich, die nahezu alle mit einer Wireless-Schnittstelle ausgestattet sind. Hier ist der Prozess der Weiterleitung an ein Servicezentrum inkl. Feedback und gegebenenfalls einer Intervention relativ gut fortgeschritten.



(a) Heart Scan von Omron [6]

(b) mobile 12-Kanal EKG Lösung von Envitec

Abb. 3.8: Weitere verfügbare mobile EKG-Lösungen

Heart Balance bietet ein mobiles EKG mit einer grafischen Analyse inkl. Herzratenvariabilität an, wie es Abbildung 3.9 zeigt, und wird in Studien und von Biofeedback-Therapeuten eingesetzt.

Glucosemessgeräte:

Diabetiker sind auf die regelmäßige Kontrolle ihres Blutzuckers und die Anpassung ihres Lebensstils angewiesen. Stand der Technik dafür ist seit langem die Bestimmung des Blutzuckers unter Verwendung eines Pens und Glucosemeters mittels Streifentechnik. Die Analyse erfolgt elektrochemisch.

Gerade bei der Kontrolle des Blutzuckers und des Managements der Betroffenen steckt ein sehr hohes Nutzenpotential in der telemedizinischen Betreuung und der Integration in ein Gesamtsystem. Ein Realtime-Feedback und gezielte Interventionen können bei Diabetikern eine sehr große Erleichterung darstellen und zur Kostensenkung beitragen.

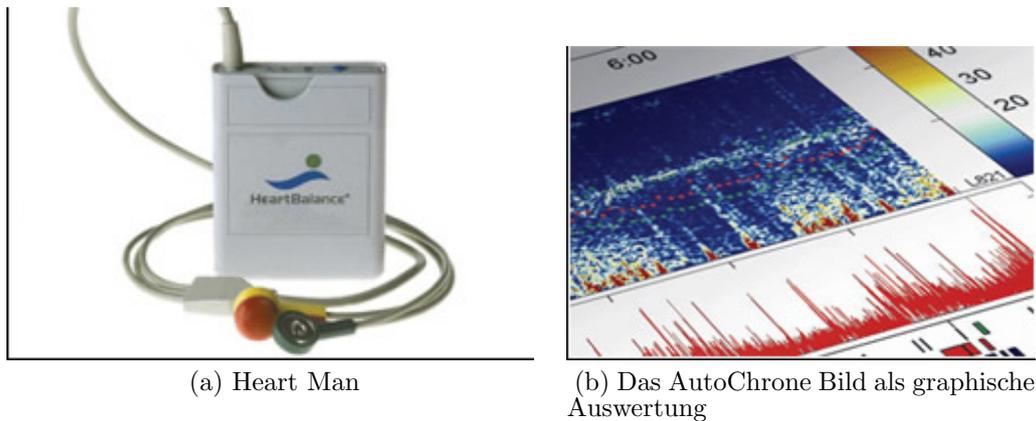


Abb. 3.9: Heart Man inkl. Grafikanalyse von Heart Balance [14].

Zunehmend werden Lösungen angeboten, die die elektronische Diabetes-Tagebuchführung ermöglichen [9]. Da auch viele Hypertoniker von Diabetes betroffen sind, gibt es heute mittlerweile Kombinationsmessgeräte beispielsweise von der Beurer GmbH.

LG hat als bisher einziger Handyhersteller ein Mobiltelefon mit integrierter Streifenanalytik zur Blutzuckerbestimmung entwickelt. Abbildung 3.10 zeigt das Gerät von LG. Es ist allerdings nur auf dem asiatischen Markt verfügbar. Aufgrund der inkompatiblen Mobilfunkstandards funktioniert es nicht in Europa.

Motion Tracking Systeme:

Das Bewegungsmonitoring hat eine hohe Bedeutung insbesondere als adjunkte Therapie bei chronischen Erkrankungen wie Bluthochdruck, Diabetes mellitus, Adipositas, dem metabolischen Syndrom aber auch bei Depressionen. Durch regelmäßige Bewegung ist in vielen Fällen die Medikation reduzierbar und in leichten Fällen kann sie sogar auch ganz abgesetzt werden. Darum rückt die Aufzeichnung patientenspezifischer Bewegungs- und Aktivitätsdaten immer mehr in den Vordergrund.

Zur Erfassung der Aktivität werden überwiegend einfache Schrittzähler mit den gängigen Aktivitätsparametern Schritte, Distanz und Kalorienverbrauch eingesetzt. Da für die medizinische Anwendung weitere Aussagen über die körperliche Aktivität wichtig sind, setzen sich immer mehr aktivitätserfassende Systeme mit dreidimensionalen Beschleunigungssensoren durch. Diese ermöglichen eine Schrittmustererkennung oder Ganganalyse, wie sie am Heinz Nixdorf-Lehrstuhl für Medizinische Elektronik im Rahmen eines weiteren Projektes umgesetzt wurde. Daraus ist eine Aktivitätskarte ent-



Abb. 3.10: Diabetes-Handy von LG [13].

standen [29, 44]. Die meisten Geräte werden im Fitnessbereich angeboten. Hier hat sich in den letzten zwei Jahren ein neuer Markt für Mobile Motion Tracking Technologies entwickelt. Bislang findet sich nur ein Produkt, welches auch für den Gesundheitssektor angeboten wird. Hierbei handelt es sich um den AiperMotion von Aipermon, der gezielt für die Therapieunterstützung von adipösen und kreislaufunfähigen Menschen entwickelt wurde.

3.2.1.2 Systeme

Exemplarisch sei hier das System der I.E.M. GmbH aus Stolberg erläutert [8]. I.E.M. bietet einen e-health Service zum Blutdruck- und Gewichtsmonitoring an. Dabei handelt es sich um ein System aus Hardware und Software, bestehend aus den Telemetrie-Systemen Oberarmmess- oder Handgelenkmessgerät für die Blutdruckmessung, einer Waage, einem Handy oder Modem und der Hypertonie Management Software (HMS), welche Alarmfunktionen bei Abweichungen beinhaltet sowie einen Statusreport. Bei Grenzwertüber- oder unterschreitung wird ein Fax an den Arzt gesendet und/oder der Patient per SMS benachrichtigt, sollte eine Wiedereinbestellung in die Praxis erforderlich sein.

Zusätzlich werden einige Logistik- und Serviceleistungen angeboten. Mit dieser Ausstattung und Diensten realisieren sie

- die Virtuelle Hypertonie oder Herzinsuffizienz Praxis,
- und das e-health service Datenmanagement.

Die Geräte werden häufig in klinischen Studien eingesetzt und sind in Telemonitoring-Plattformen anderer Hersteller und Anbieter integriert.

Daneben gibt es eine gerade in den letzten zwei Jahren stark wachsende Zahl nationaler und internationaler Anbieter ähnlicher Systeme. Sie zeichnen sich allesamt dadurch aus, dass sie das Spektrum der biomedizinischen Sensorik in ein solches telemedizinisches System integrieren und an ein Datenzentrum anbinden.

3.2.2 Telemonitoring-Gesamtsysteme

Die Telemonitoring-Gesamtsysteme zeichnen sich dadurch aus, dass sie die alle bisher beschriebenen Elemente und Funktionen vereinen und telemedizinische Dienstleistungen anbieten. Es gibt mehrere Telemedizin Center in Deutschland sowie im Ausland. Im Wesentlichen arbeiten sie alle nach der gleichen Struktur. Sie differenzieren sich in ihrer Zielgruppenausrichtung und Angebotsschwerpunkten.

So betreut PHTS vorwiegend Risikopatienten mit chronischen Erkrankungen im Rahmen von Disease-Management-Programmen. Vitaphone ist mit dem Herzhandy bekannt geworden und fokussiert neben den Herzpatienten zunehmend auf die Gruppe der Diabetiker. Die Arztpartner Almeda AG bringt ihre Dienste überwiegend in klinische Studien in Zusammenarbeit mit Krankenversicherern ein.

Als Best-Practice-Beispiel ist an dieser Stelle das Schweizer Zentrum für Telemedizin – Medgate herauszustellen [148, 149]. Es bietet nahezu das gesamte medizinische Spektrum an und hat die gesamten Prozesse samt Technik vorbildlich gelöst. Abbildung 3.11 stellt das Gesamtangebot von Medgate dar. Abbildung 3.12 zeigt den Prozessablauf.

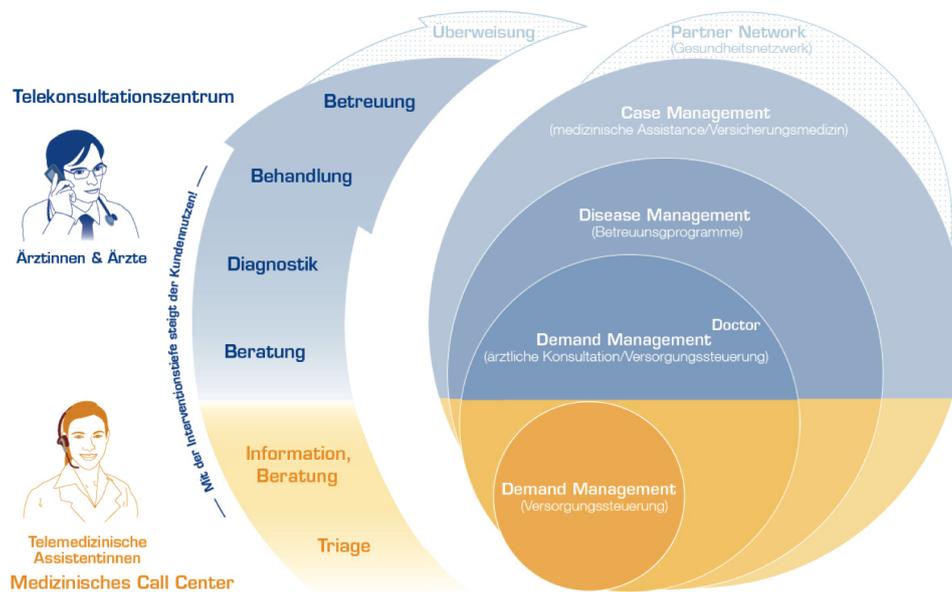


Abb. 3.11: Das Leistungsangebot von Medgate, entnommen aus [149]

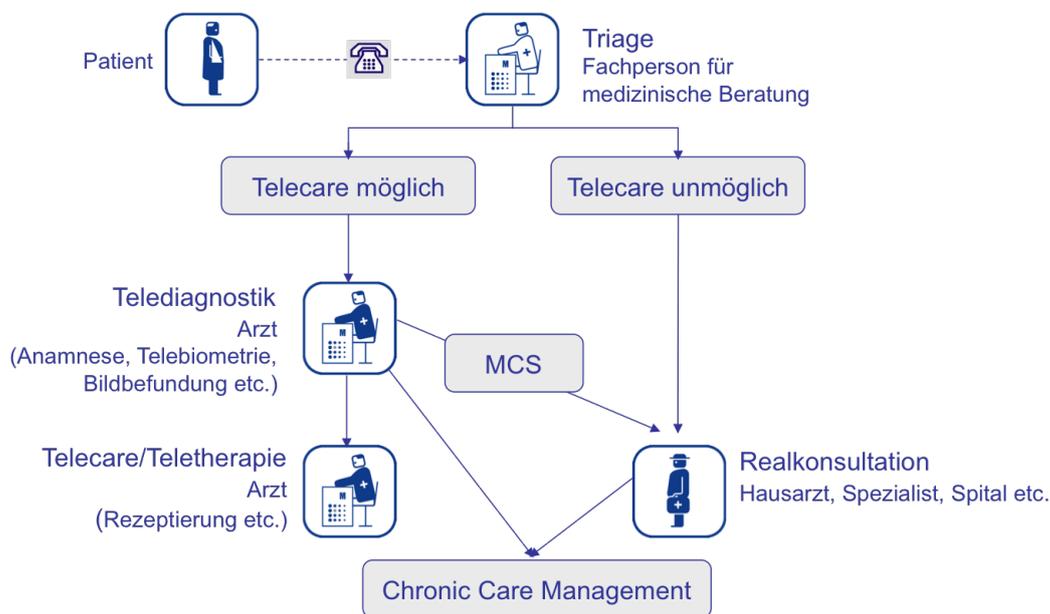


Abb. 3.12: Der Prozessablauf bei Medgate, entnommen aus [149]

3.3 Musik in Medizin und Therapie

Trotz intensiver Forschung ist die Wirkungsweise und neuronale Verarbeitung von Musik bis heute nicht komplett verstanden. Deshalb gibt es bisher auch kaum einen wissenschaftlich-systematischen Ansatz, Musik zu finden, die die gewünschte emotionale und körperliche Reaktion hervorruft.

Dennoch ist die modulierende und heilende Wirkung von Musik unumstritten, weshalb sie in musiktherapeutischen Kontexten intensiv eingesetzt wird. Es haben sich einige wenige Gruppen herausgebildet, die diese Fragestellung wissenschaftlich untersuchen, um eine Anwendung auf den Markt zu bringen.

Das Interactive Institute aus Schweden hat eine tragbare Lösung BodyResT entwickelt, welche individuelle Musik zur Entspannung erzeugt [4]. Dabei passt sich die Musik durch die Erfassung physiologischer Parameter und einen entsprechenden Algorithmus an den individuellen Stresslevel an.

Basierend auf der gleichen Idee wie sie in der vorliegenden Arbeit umgesetzt wird, aber mit einem völlig anderen Untersuchungsansatz, verfolgt Vera Brandes mit ihrem Forscherteam die Entwicklung der Audiotherapie. In einem Interview im Rahmen der Radiosendung Gesundheitsmagazin des Bayerischen Rundfunks erklärte sie die Theorie, dass Patienten mit primärer Hypertonie an einem Verlust der Entspannungsfähigkeit leiden, der geheilt werden muss [34]. Dafür setzt sie eine Audiotherapie mit individuell für den Patienten komponierter Musik an. Die Generierung der therapeutischen Musiksequenzen basiert auf Zeitreihenanalysen mittels neuronaler Netze [66].

In der Musiktherapie wird vielfach Musik eingesetzt, um die Arbeit mit dem Patienten zu fördern, beziehungsweise ihn durch die Wirkung von Musik zu beeinflussen. Auch wenn das Ganze oft unter dem Schlagwort *Musiktherapie* beschrieben wird, ist es wichtig, an dieser Stelle zu differenzieren: Musiktherapie beschreibt im Gegensatz zur *Musikmedizin* die Arbeit eines ausgebildeten Musiktherapeuten mit seinem Patienten, bei der Musik gemacht, gehört oder auf eine andere Weise genutzt wird. Demgegenüber wirkt funktionelle Musik ohne den Therapeuten rein dadurch, dass der Patient sie anhört. Wobei sich nach neuem Psychotherapieverständnis der Patient nur selbst heilen kann, die Musik also nicht unmittelbar wirkt, sondern nur die Krankheit heilsam beeinflusst [43].

Heute wird funktionelle Musik in vielen Bereichen eingesetzt, etwa bei der Physiotherapie, Beschäftigungstherapie, Schmerztherapie, der Betreuung geistig Behinderter oder der Psychiatrie [97].

Es existiert bereits eine Auswahl kommerziell verfügbarer therapeutischer Musik speziell gegen Bluthochdruck oder Herz-Kreislaufbeschwerden. Erhältliche CDs wurden von Ralph Spintge, Decker-Voigt, der Deutschen Hochdruckliga oder auch von der Rehaklinik Glotterbad [88] herausgegeben. Die angebotenen Musikaufnahmen sind fast ausschließlich elektronischen Charakters und teilweise mit Sprechern unterlegt, so dass sie in dieser Arbeit keine Verwendung finden können.

3.4 Fazit

Informations- und Kommunikationstechnik:

Die Informations- und Kommunikationstechnik stellt heute mehr als nur die hinreichenden Möglichkeiten zur Verfügung. Mittlerweile gehört zum Standard:

- mobile Endgeräte zu vernetzen, an das Internet anzubinden und die Daten mit ausreichend hohen Datenraten sicher zu übertragen
- alle Endgeräte haben Anbindung an das Internet mit allen Varianten der Kommunikation von Telefonieren, SMS, MMS, E-Mail über die Integration einer Kamera bis hin zur Videokonferenz sowie entsprechender Personalisierungsmöglichkeiten

Biomedizinische Sensorik:

Es gibt beliebig viele biomedizinische, mobile, kleine Messgeräte mit integrierter Sensorik und telemedizinischen Übertragungsmodulen, die die Erfassung sämtlicher Vitalparameter, beispielsweise Blutdruck, EKG, Glucose, Herzrate, Bewegung oder Aktivität, Gewicht, Sauerstoffsättigung und weitere ermöglichen.

Mittlerweile sind alle Messgeräte mit genügend Speicherkapazität ausgestattet, um Daten für eine längere Zeit zwischenspeichern und es haben auch fast alle Geräte eine Schnittstelle zum PC als Einzelplatzlösung mit der Option zur Mehrplatzfähigkeit. Nahezu jeder Hersteller bietet diese Messgeräte auch mit einer Funkschnittstelle und/oder USB-Anschluss an. Somit ist die Kopplung an ein Handy, PDA oder Laptop leicht

möglich. Diese Ausstattungsmerkmale sind Stand der Technik und keine Besonderheit mehr.

Weiterverarbeitung und Auswertung:

Alle Daten werden in eine Datenbank übertragen und dort in eine patientenbezogene Akte abgelegt. Damit ist die Basis für das Telemonitoring ohne Probleme vorhanden. Noch nicht gelöst und Gegenstand der Forschung ist dagegen die intelligente, kontextabhängige Verarbeitung und Analyse der Daten mit den entsprechenden diagnostischen und therapeutischen Konsequenzen.

Feedback und Intervention:

Die Möglichkeiten ein zeitnahes Feedback und eine direkte Intervention an den Patienten zurückzugeben sind nur rudimentär gegeben. Nur einige Anbieter senden bei Abweichung der voreingestellten Grenzwerte ein Fax an den behandelnden Arzt. Ebenfalls kann der Patient per SMS zu bestimmten Aktionen aufgerufen werden, beispielsweise zur Sprechstunde in die Praxis zu kommen. Weiterreichendes Feedback bis hin zu einem dialogorientiertem Feedback ist nicht gegeben.

Handlungsanweisungen bis hin zur elektronischen Rezeptaussstellung kann das Telemedizinzentrum Medgate in der Schweiz erteilen. In der Schweiz besteht eine andere Gesetzeslage, so dass dies im Gegensatz zu Deutschland möglich ist. Ansonsten versuchen die betreuenden Telemedizin Center im Telefongespräch mit dem Patienten Veränderungen oder Beratungen zu initiieren.

Personalisierung und Individualisierung:

Im Allgemeinen wird die Personalisierung durch Einstellungen am Gerät, wie beispielsweise verschiedene Screens, Tastenbelegungen, Alarm- oder Weckerfunktion als Reminder, selbst gelöst. Es gibt keine Lösungen, persönliche Eigenarten oder Präferenzen (z.B. den Musikgeschmack) der Patienten für oder gegen bestimmte therapeutische Maßnahmen berücksichtigen. Teilweise werden Patienten je nach individuellem Krankheitsbild mit bestimmter Sensorik ausgerüstet. Die technischen Lösungen werden dabei jedoch nicht auf die individuellen Bedürfnisse der Nutzer abgestimmt. Eine automatisierte Dialogführung ist kaum vorhanden, außer bei Vitaphone oder Bosch Healthcare mit der „RTX-Box“.

Interoperabilität:

Es gibt kaum einen Hersteller, der das gesamte Geräte Portfolio mit einer einheitlichen Schnittstelle ausstattet. Die meisten Systemanbieter umgehen das Problem, indem sie

die Sensoren an eine Basisstation anbinden, die alle erforderlichen Schnittstellenumsetzer enthält. Damit ist dann nur das zentrale Systemkonzept realisierbar.

Medizinische Dienstleistungen:

Ein Angebot von verschiedenen Telemedizin Centern mit medizinischer Dienstleistung ist vorhanden. Alle großen Telemedizinzentren betreiben selbst ein oder kooperieren mit einem medizinischem Callcenter.

Technische Dienstleistungen:

Dagegen gibt es keinen Telemedizin-Anbieter, der konkret technische Dienst- und Serviceleistungen rund um die Geräteausstattung im Leistungsangebot hat. Ansatzweise bietet I.E.M. Logistik und Service an. Jedoch verfügt noch kein Anbieter über ein vergleichbares Angebot wie es bei den großen Kommunikationsanbietern Standard ist.

Musik als Therapeutikum:

Musik als Medizin ist ein vielfach nachgewiesenes positiv wirksames Mittel und Therapeutikum. Es existieren einige wenige unterschiedliche Realisierungsansätze für die therapeutische Anwendung. Jedoch handelt es sich dabei um spezifische Einzellösungen. Einzig die Forschergruppe um Vera Brandes und die Sanoson GmbH bieten seit Mitte 2009 eine systemische Audiotherapie an. Allerdings erfordert dieses Konzept aufwendige individuelle Anpassungen des Klangmaterials an jeden Nutzer.

4 Aufbau eines virtuellen telemedizinischen Labors - Virtual Lab

4.1 Laboraufbau

Mit den zuvor beschriebenen Komponenten wurde ein virtuelles telemedizinisches Labor aufgebaut. Die folgenden Abbildungen 4.1 bis 4.6 zeigen die Realisierung.

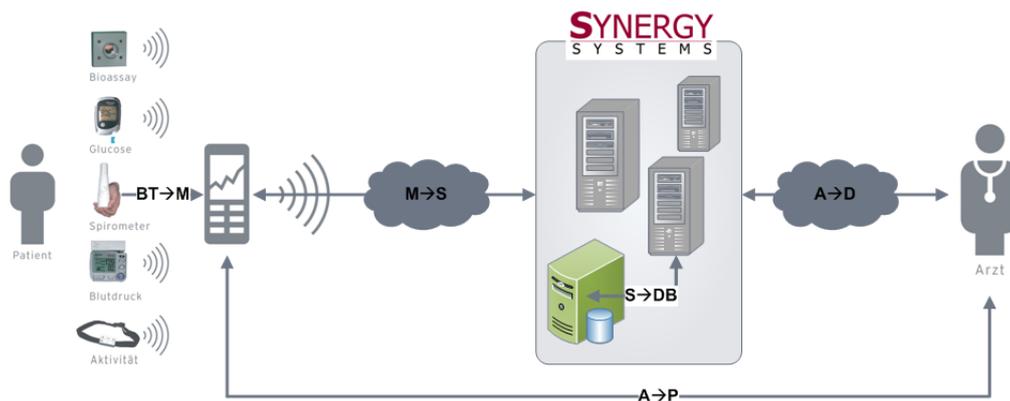


Abb. 4.1: Gesamtsystem mit den Kommunikationsstrecken.

Abkürzung	Strecke
BT→M	Bluetooth-Dongle→Mobil-Gerät
M→S	Mobil-Gerät→Server
S→DB	Server→Persistenter Speicher
A→D	Arzt→Datenprovider
A→P	Arzt→Patient

Tab. 4.1: Abkürzungen der Kommunikationsstreckenabschnitte

Das Virtual Lab basiert auf 30 Handgelenksmessgeräten. Um einerseits patienten- und arzt-spezifischen Präferenzen gerecht zu werden und andererseits die Modularität des

Systems zu demonstrieren, wurden die Messgeräte von zwei unterschiedlichen Herstellern verwendet. Dabei handelt es sich um die Messgeräte RX-Genius (637 IT) der Fa. Omron sowie tenso-comfort der Fa. Biocomfort wie sie auf Seite 75 in Abbildung 3.4 zu sehen sind. Die bluetoothfähige Variante wurde von der Sendor GmbH bezogen.

Als mobile Geräte wurden Mobiltelefone mit dem Betriebssystem Symbian OS in den Versionen 2.2 oder 2.3 und einem integriertem mp3-Player gewählt. Wie bei den Blutdruckmessgeräten wurden verschiedene Endgeräte in das virtuelle Labor eingebunden, wie in Abbildung 4.2 dargestellt. Darauf wurde ein Symbian-Programm (ebenfalls von der Sendor GmbH) installiert, welches ein eindeutiges Pairing zum zugehörigen Messgerät herstellt und die darüber empfangenen Messwerte für den Datenversand per GPRS/UMTS verarbeitet.

Aus Sicht des Patienten beschränkt sich die Benutzung dieses Systems lediglich auf das Ein- und Ausschalten des Messgeräts, die Übermittlung der gemessenen Blutdruckwerte erfolgt vollautomatisch.



Abb. 4.2: Die Mobiltelefone des Virtual Lab: Siemens SX1, Nokia 6680, Nokia N70, Nokia N73

Die Übertragung der Daten erfolgt durch das Senden einer E-Mail mit den formatierten Blutdruck-Daten. Das Senden der E-Mail erfolgt über SMTP¹. SMTP ist die Anwendungsebene im OSI-Schichtenmodell. Die Kommunikation findet per TCP/IP statt. Die für TCP/IP benötigten Protokollstacks sind im verwendeten Betriebssystem Symbian OS bereits vorhanden.

Die per E-Mail an ein Postfach übermittelten Daten werden von Synergy Systems per POP3 abgeholt und anschließend durch ein Importmodul in die entsprechenden

¹ SMTP – Simple Mail Transfer Protocol

Datenbanktabellen eingetragen. Als Datenbanksystem wird MySQL in der Version 4.2.9 verwendet.

Der Arzt greift auf die in der Datenbank gespeicherten Patientendaten per Webinterface zu. Die Oberfläche ist in PHP realisiert und greift durch die Abstraktionsschicht PEAR auf die MySQL-Datenbanken zu. Durch die verwendete Abstraktionsschicht können auch andere Schnittstellen zur Verfügung gestellt werden. Diese könnten z.B. XML, XML-RPC oder auch SOAP sein.

In der aktuellen Implementierung wird die Therapieanweisung des Arztes – hier der Name der Audiodatei, welche am Mobilgerät abgespielt werden soll – per SMS direkt an das Mobiltelefon des Patienten gesendet.

Zur Demonstration einer vollständigen Automatisierung der Interventionsstrecke, wird exemplarisch der handyinterne Audioplayer angesteuert. Die dazu entwickelte Interventionssoftware ist auf dem Mobiltelefon installiert und wird beim Booten des Handys automatisch gestartet [85]. Die Software wertet die SMS aus und spielt sofort automatisch das gewünschte Stück auf dem Mediaplayer des Mobiltelefons ab. Hier ist keine Interaktion des Benutzers nötig. Dieser Prozess ist in Abbildung 4.3 schematisch dargestellt. Die Initiierung erfolgt manuell nachdem der Arzt die Daten des Patienten über die Internetoberfläche überprüft hat.

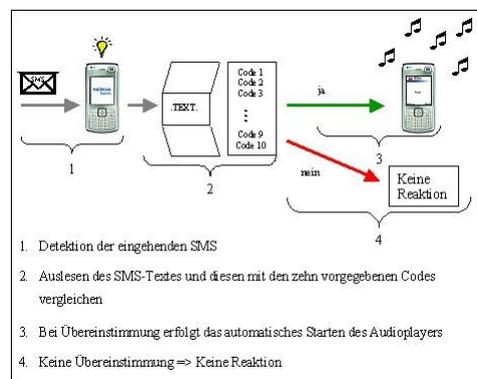


Abb. 4.3: Funktionsweise der implementierten Interventionssoftware

Der Messkitkoffer als patientengerechte Ausstattung ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Einige Bilder aus der Praxis sind in Abbildung 4.5 zu sehen sowie in Abbildung 4.6 ein Screenshot der Datenbankoberfläche.



Abb. 4.4: Die patientengerechte Ausstattung – der Messkitkoffer



Abb. 4.5: Zwei Anwendungsbeispiele der akustischen Biofeedback-Therapie mittels Virtual Lab

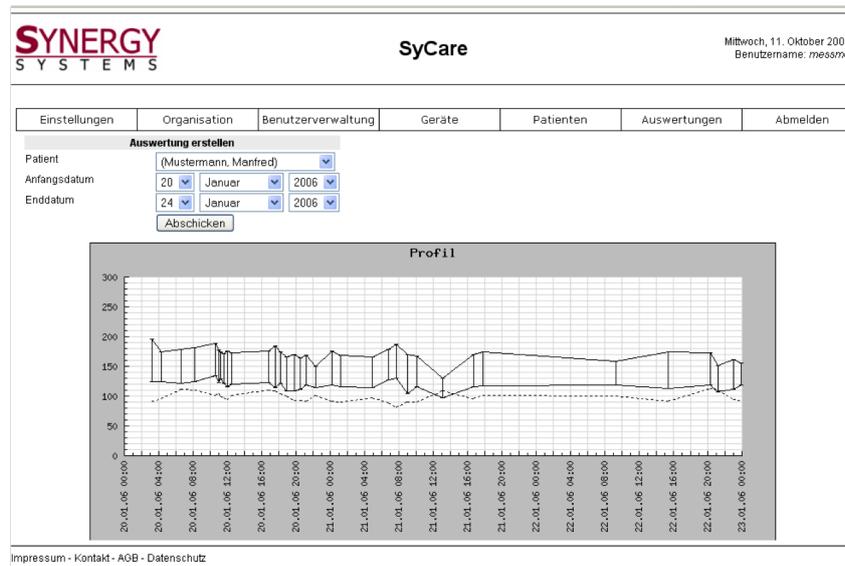


Abb. 4.6: Ein exemplarischer Screenshot der SynergyCare Benutzeroberfläche, Stand Ende 2006. Zu sehen ist der zeitliche Blutdruckverlauf eines 42-jährigen männlichen Probanden.

Konzeption der Datenbank

Zusammen mit der Synergy Systems GmbH² wurde die dazugehörige Datenbank SynergyCare entwickelt und implementiert. Dort werden erhobenen Messwerte gespeichert und aufbereitet. Mit entsprechender Authentifizierung kann jederzeit über das Internet auf die Datenbank zugegriffen werden. Diese Authentifizierung erfolgt über eine Secure Socket Layer (SSL) verschlüsselte Hyper Text Transfer Protocol Secure (https) Verbindung mit einer Benutzerkennung und einem entsprechenden Passwort. Dieses browserbasierte Übertragungsverfahren wird beispielsweise auch beim Online-Banking verwendet. Sowohl Patienten als auch medizinisches Personal können diese Datenbank als registrierte Nutzer mit spezifischen Benutzerrechten einsehen und die von den Patienten selbst gemessenen Werte anzeigen lassen.

Das umfassende Modell der relationalen Datenbank SynergyCare ist im Anhang A.1 dargestellt.

Das Virtual Lab, als telemedizinische Gesamtsystem, stellt die Grundlage für alle folgenden Messungen, Versuche und klinischen Untersuchungen dar.

² Kooperationspartner des Heinz Nixdorf-Lehrstuhls für Medizinische Elektronik

4.2 Das akustische Material

Decker-Voigt, Psychologe und Musiktherapeut, war einer der ersten, der funktionelle Musik³, deren musikalische Eigenschaften und auch deren Wirkung auf den Blutdruck in seinem Buch *Aus der Seele gespielt* [43] systematisch beschrieben hat.

In Folge davon beschäftigen sich zahlreiche Studien mit blutdrucksenkender Musik. Eine Literaturanalyse dazu ist in der Arbeit von Georg [74] zu finden. Da die meisten keine Informationen über die verwendeten Musikstücke geben und meist nur vage Genreangaben machen, sind aus der Literatur nur einige wenige Musikstücke namentlich bekannt, mit denen nachweislich eine Blutdrucksenkung hervorgerufen werden konnte. Jedoch ist es sehr plausibel, dass sich im nahezu unbegrenzten Fundus an verfügbarer Musik – selbst bei einer Begrenzung auf ausschließlich klassische Musik – weitere Stücke mit eben dieser Wirkung finden lassen.

Ergotrope Musik

Selbstverständlich wirkt nicht jedes Musikstück blutdrucksenkend – im Gegenteil: Eine ganze Reihe von Stücken wirkt genau gegensätzlich, führt zu einer Emotionalisierung bis zur Erregung, was sich in einem größeren Hautwiderstand, einer Beschleunigung der Atemfrequenz oder einer Erhöhung des Blutdruckes äußert. Diese Musik, die auf den Sympathikus wirkt – also den Teil des vegetativen Nervensystems, der die Leistungsfähigkeit des Körpers erhöht –, wird in der Musikpsychologie *ergotrope Musik*⁴ genannt, wobei sich der Begriff allerdings nicht auf die Musik an sich, sondern vielmehr auf die beobachtete Reaktion der Menschen auf diese Musik bezieht.

Trotzdem versucht Decker-Voigt, ergotrope Musik musikalisch zu klassifizieren und nennt

- einen stark akzentuierten Rhythmus,
- rigide, sich möglicherweise beschleunigende Rhythmen,
- Stakkato-Charakter,
- Dur-Tonarten,

³ in anderen Publikationen auch „funktionale Musik“

⁴ ergotrop: von *ergein* (griech.) stimulieren, aktiv sein

- Dissonanzen und Betonung der Dissonanzen,
- eine erhöhte harmonische Aktivität,
- größere Dynamik und,
- einen starken Auftrieb und abrupten Abfall der Tonlinie

als Kriterien für die Eingruppierung.

Trophotrope Musik

Neben einer Reihe von Musik, die indifferent wirkt und verschiedene Tonuslagen anspricht, gibt es die *trophotrope Musik*⁵ [43]. Sie stimuliert den Vagusnerv und damit den parasympathischen Teil unseres vegetativen Nervensystems, der für eine Beruhigung zuständig ist. So wirkt die trophotrope Musik genau gegensätzlich zur ergotropen, führt zu einer Entspannung der Skelettmuskulatur, einem geringeren Hautwiderstand, sowie einer allgemeinen, bis hin zur Schläfrigkeit führenden Beruhigung mit Verlangsamung der Atem- und Herzfrequenz und einem Abfall des Blutdruckes – das ist also die für die akustische Biofeedback-Therapie gesuchte Musik!

Als musikalische Eigenschaften nennt Decker-Voigt im Wesentlichen das jeweils Konträre zur ergotropen Musik:

- schwebende, wenig akzentuierte Rhythmik,
- Vorherrschen von Legato,
- vorwiegend Moll-Tonarten,
- Konsonanzen vorherrschend,
- durchgängige harmonische Grundbewegung,
- geringe Dynamik,
- sanftes Fließen der Melodie.

⁵ Trophotropie: Zustand des vegetativen Nervensystems, der Erhaltung oder Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit dient.

Diese Kriterien sind, genau wie bei der ergotropen Musik, auf keinen Fall als eine Art mathematisch-kausale Definition zu betrachten, sondern liefern lediglich Indizien, die für die Eingruppierung sprechen können.

Es ist zu beachten, dass die Übergänge zwischen ergotrop und trophotrop wirkender Musik fließend sind und somit auch Decker-Voigts Kriterien nur als relative Anhaltspunkte zu verstehen sind. Einzelne Kriterien können nicht erfüllt oder vielleicht genau gegenteilig sein – erst das Zusammenspiel aller Faktoren macht die Wirkungsweise.

Funktionseinschränkungen und „Nebenwirkungen“

Da die Wirkung der Musik ein unbewusster Vorgang ist, funktioniert er grundsätzlich bei jedem Menschen und mit einem im Vergleich zu anderen, etwa optischen Reizen sehr geringen Gewöhnungseffekt [43]. Allerdings hängen einige Parameter stark von der musikalischen Vorprägung ab, so unterscheidet sich speziell das Harmonieempfinden verschiedener Kulturkreise sehr stark.

Wichtige Voraussetzung ist eine gewisse emotionale Erregbarkeit des Hörenden, die durch bestimmte Verletzungen wie auch durch eine stark ablehnende Einstellung eingeschränkt sein kann [43].

Durch die unbewusste Wirkung kann zudem eine Reihe von „Nebenwirkungen“ entstehen. So muss sich die Grundstimmung des Hörenden im weitesten Sinne mit dem Charakter der Musik decken. Jemand, der gerade vor Wut kocht, wird auch durch ein sehr trophotropes Stück nicht schlagartig ruhig, sondern kann sich im Einzelfall dadurch sogar noch weiter in seine negative Stimmung hineinsteigern. Stattdessen wäre es sinnvoller, seine Stimmung mit einer eher ergotropen Musik aufzunehmen und diese langsam ruhiger werden zu lassen.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass ein bestimmtes Musikstück beim Hörenden falsch besetzt ist. So beschreibt Decker-Voigt einen Fall, wo der Patient einen bestimmten Marsch als beruhigend empfand, da dieser in ihm Erinnerungen an ein mit Beruhigung assoziiertes Kindheitserlebnis geweckt hatte. Der umgekehrte Fall trat in der Arbeit von Georg [74] ein: Dort befand sich unter den Probanden eine Berufsmusikerin, die eines der trophotropen Musikstücke schon so oft selbst spielen musste, dass die Lust, es abermals anhören zu müssen, sehr gering war und sich eine blutdrucksenkende Wirkung nicht einstellen konnte.

Aus diesem Grund kommt Brandes zum Schluss, dass nur unbekannte – also speziell zu diesem Zweck komponierte – Musik zum Einsatz kommen dürfte[35].

Dennoch setzt der Ansatz dieser Arbeit auf klassische Musik, denn im Gegensatz zu einer im Handel erhältlichen CD mit blutdrucksenkender Musik handelt es sich bei diesem Projekt um ein ärztlich betreutes Therapiesystem. Ziel ist, dass jeder Patient in Absprache eine individuelle Musikstückauswahl erhält, die auch seinen eigenen Vorlieben und Gewohnheiten Rechnung trägt, so dass eine prinzipielle, negative Grundhaltung weitgehend ausgeschlossen werden kann.

4.2.1 Ausgangsmaterial

Das für die Analyse verwendete Klangmaterial setzte sich ausschließlich aus klassischen, instrumentalen Orchesterwerken zusammen. Die Auswahl wurde aufgrund mehrerer Literaturhinweise, sowie der Natürlichkeit und Komplexität solch akustischer Signale bewusst so getroffen. Diese Klangdarbietungen sind dem Hörer wohlbekannt und vertraut. So ist auch keine Manipulation des menschlichen Organismus durch einen Sprecher oder inhaltliche Elemente möglich.

Musikauswahl

Ein klarer Vorteil der hier favorisierten, klassischen Musik ist, dass ihr im Gegensatz zu anderer Musik sowohl aus dem theoretischen Blickwinkel der Gehirnforscher als auch aus der praktischen Sicht der Musiktherapeuten der größte therapeutische Effekt beschieden wird [131]. Hier wurden jeweils 34 ergotrop beziehungsweise trophotrop wirkende Musikstücke untersucht. Sie bilden eine ausreichend große Basis für die Klassifikatorentwicklung.

Die vollständige Musikauswahl findet sich für die ergotrope Musik in Anhang B.1 und für die trophotrope Musik in Anhang B.2 zusammen mit der Besetzung sowie dem Entstehungsjahr.

Dabei finden sich in beiden Gruppen barocke Werke vom Anfang des 18. Jahrhunderts (Bach, Händel und Vivaldi) bis hin zum Umbruch in die Moderne zum Anfang des 20. Jahrhunderts (Mahler und Strawinsky).

Auch sind in beiden Gruppen alle Besetzungstypen vertreten: Vom Orchester mit der jeweiligen Instrumentierung seiner Epoche über kammermusikalische Werke bis hin zu

Soloinstrumenten wie Klavier oder Flöte mit Cembalo.

Außerdem wurden neue Werksgattungen eingefügt, die Decker-Voigt explizit erwähnt hat, oder die doch sehr gut auf seine Beschreibung passen [43]. Dazu gehört zum einen ein Wiegenlied auf der trophotropen Seite und zum anderen Marschmusik mit zwei Märschen von Meyerbeer und Strauss auf der ergotropen Seite. Auch drei Werke aus der Filmmusik, die ganz gezielt komponiert wurde, um beim Zuhörer Emotionen zu erzeugen und ihn mitzureißen, wurden einbezogen.

So wie es auch im Alltagsleben schwieriger ist, aus einer Vielzahl an sehr ähnlichen Angeboten ein geeignetes auszuwählen, als aus einer sehr überschaubaren Menge, ist es auch hier wesentlich komplizierter – oder aus dem statistischen Blickwinkel besser gesagt: unwahrscheinlicher – 68 Musikstücke scharf in zwei Gruppen zu klassifizieren, als die bisher betrachteten dreißig, da hier die Wahrscheinlichkeit von statistischen „Ausreißern“ zunimmt. Jedoch wird sich genau hier die Qualität des Klassifikators zeigen – beziehungsweise, ob überhaupt verbindende Merkmale innerhalb der beiden Gruppen existieren.

4.2.2 Identifizierung der therapeutischen akustischen Muster

Um die musikalischen Wirkbestandteile, also die Merkmale, Parameter oder Muster in der Musik zu ermitteln, die den blutdrucksenkenden Effekt hervorrufen, werden signaltheoretische Ansätze verfolgt, sowie Verfahren der Mustererkennung und Merkmalsextraktion auf die Klänge angewendet. Zur Darstellung der diese Signale bestimmenden physikalischen Parameter werden interaktive Filtersysteme benutzt. Damit werden ebenfalls die bioakustisch relevanten Muster isoliert. Solange keine eindeutigen Referenzmuster existieren, sind Verfahren der Mustererkennung schwierig anzuwenden. Daher wurden im ersten Ansatz mehrere auf die blutdrucksenkende Wirkung bezogene Referenzstücke (J. S. Bach, Air aus der Orchestersuite Nr. 3, W. A. Mozart, 2. Satz des Klavierkonzerts Nr. 21, J. Pachelbel, Kanon in D) hinsichtlich der Gemeinsamkeiten in ihrer Signalzusammensetzung untersucht. Die so ermittelten bioakustisch relevanten Marker wurden skelettiert und aus den Fragmenten ein neues (über-)optimales Klangmuster generiert.

4.2.2.1 Spektralanalysen

In [28] wurden zunächst die Spektren der Musikstücke untersucht. Da hier nur wenige Anhaltspunkte für die Unterscheidung von blutdrucksenkender Musik gefunden werden konnten, wurden anschließend die Spektrogramme, also der zeitliche Verlauf der Frequenzen, wie ihn Abbildung 4.7 beispielhaft an den ersten vierzig Sekunden von Beethovens fünfter Sinfonie darstellt, analysiert. Hier sind schon viele für die Klassifizierung der Musik wichtige Parameter erkennbar: Etwa ein gleichmäßiges Muster für einen gleichmäßigen, unaufgeregten Rhythmus oder – anhand der Farben, die die Energie der jeweiligen Frequenzen darstellen – die Dynamik des Musikstückes. Und bei Sekunde 15 ist eine harmonische Eigenschaft erkennenbar: Das ganze Orchester spielt unisono einen Ton – ein F –, was sich in einem komplett regelmäßigen Streifenmuster der Obertöne im Spektrogramm widerspiegelt. Diese Eigenschaften werden in Kapitel 5.2.1 dieser Arbeit wieder aufgegriffen und automatisiert als Merkmale extrahiert.

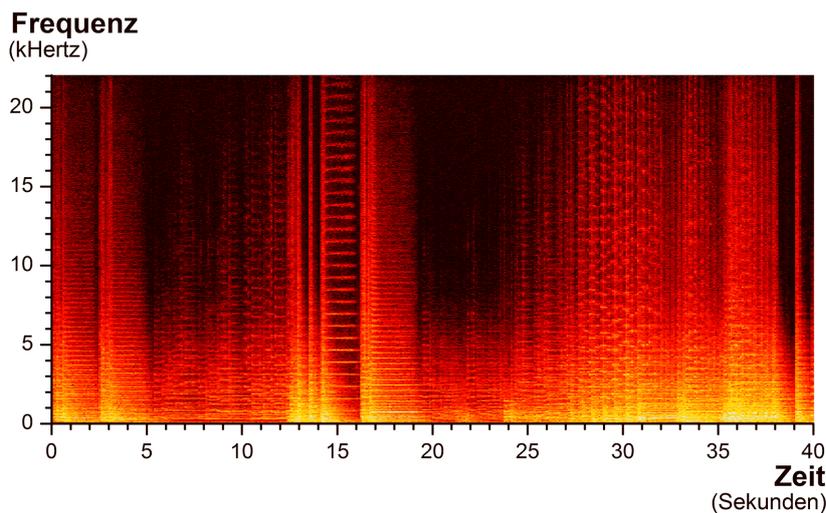


Abb. 4.7: Spektrogramm der ersten vierzig Sekunden der 5. Sinfonie von Beethoven

Trotzdem ist es nicht möglich, in den Spektren und Spektrogrammen eindeutige, gemeinsame Strukturen zu finden – dies würde implizieren, dass bestimmte Töne oder Tonfolgen die trophotrope Wirkung hervorriefen, was nach heutigem Kenntnisstand nicht zutrifft. Vielmehr scheint sich die trophotrope Wirkung wie in den vorherigen Abschnitten erläutert auf viele Eigenschaften zu stützen, die sich natürlich alle auf irgendeine Art im Spektrum (und im Zeitsignal) abbilden, aber in der Regel nicht direkt

als optisches Muster erkennbar sind. Ein Grund dafür ist auch, dass die psychoakustische Wahrnehmung von Musik wie in Abschnitt 5.2.1.1 beschrieben eine ganz andere ist, als die physikalisch mess- und im Spektrum darstellbare.

4.2.2.2 Merkmalsextraktion

Da die oben beschriebenen Signalanalyseverfahren nicht zu dem gewünschten Erfolg geführt haben, wird der Ansatz der Merkmalsextraktion verfolgt und liegt dieser Arbeit zugrunde. Alle gefundenen Merkmale werden in eine sinnvolle Ordnung gebracht und in der Softwareumgebung MATLAB implementiert.

Ein Merkmal drückt eine bestimmte Eigenschaft eines Gegenstandes – oder hier: der analysierten Musikstücke – aus. Wenn das Ziel ist, den Gegenstand zu klassifizieren, so ist das Merkmal charakteristisch für die jeweilige Sache zu wählen. Ziel einer Merkmalsbeschreibung ist immer, die jeweilige Datenmenge zu reduzieren und auf wenige, möglichst charakteristische Merkmale zu beschränken.

Im Fall der Musikstücke bedeutet dies, dass die Musik nicht mehr auf vielen Hunderten Megabytes im Zeit- oder Frequenzbereich sondern im sogenannten Merkmalsraum dargestellt wird. Hier bildet jedes erhobene Merkmal $x_i (i \in [1, d])$ eine Dimension. Alle Merkmale eines Musikstückes werden im Merkmalsvektor

$$\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_d)^T \tag{4.1}$$

zusammengefasst. Der Merkmalsvektor jedes Musikstücks bildet einen Punkt im d -dimensionalen, reellen Merkmalsraum M , so dass

$$\vec{x} \in M = R^d \tag{4.2}$$

In Abbildung 4.8a, ist beispielhaft der *Spectral Flux* – ein Merkmal, das die Dynamik eines Musikstückes beschreibt und auf das in Kapitel 5.2.1 noch genauer eingegangen wird – linear in einem eindimensionalen Merkmalsraum aufgetragen. Daneben, in Abbildung 4.8b, ist ein zweidimensionaler Merkmalsraum mit demselben Merkmal und einem weiteren Merkmal aus dem harmonischen Bereich, dem Maximum der *Spectral Flatness 2*, aufgetragen. Wie in der Abbildung 4.8 erkennbar, bilden die Punkte im Merkmalsraum bei vernünftiger (das heißt: klassenspezifischer) Merkmalswahl Cluster. Ebenfalls erkennbar ist, dass im zweidimensionalen Vektorraum die beiden Klassen

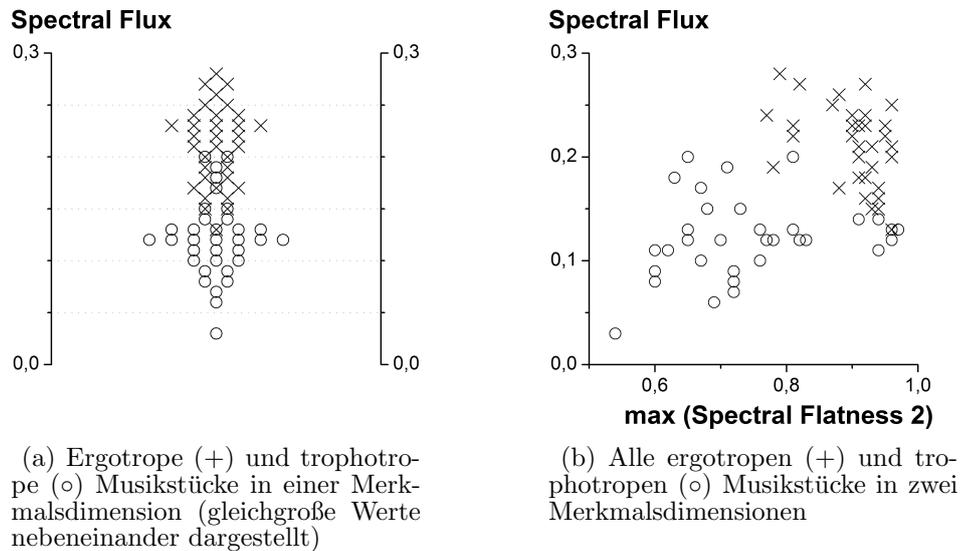


Abb. 4.8: Ein- und zweidimensionaler Merkmalsraum

schon deutlich besser getrennt werden als mit nur einem Merkmal – der erste Schritt zur Klassifizierung der Musikstücke, die Gegenstand von Kapitel 5.2.2 sein wird.

Der gesamte Prozess von den Rohdaten, dem Audiosignal auf der CD, bis zur Klassenzuordnung ist in Abbildung 4.9 schematisch dargestellt. Dieses Kapitel widmet sich im nächsten Abschnitt der Vorverarbeitung der Daten im Zeit- und Frequenzbereich. Anschließend beschäftigt sich Kapitel 5.2.1 mit der Extraktion der musikalischen Merkmale.

In Kapitel 5.2.2 wird dann der Weg von über 400 extrahierten Merkmalen zu einigen wenigen charakteristischen sowie der darauf basierende Entwurf des Klassifikators beschrieben.

Signaltheoretische Grundlagen

Ein Signal ist in der Signalverarbeitung ein Träger von Information und Energie [132]. In unserem Fall ist die Basis aller Berechnungen ein digitales Audiosignal. Im Zeitbereich liegt die Abtastrate bei 44,1 kHz. Auf dem Computer werden die Puls-Code-modulierten Rohdaten im Wave-Dateiformat gespeichert, bei einer Stereo-Aufnahme mit zwei Kanälen entsteht also ein Bitstrom von

$$2 \cdot 16 \text{ Bit} \cdot 44\,100/\text{s} = 1\,411\,200 \text{ Bit/s.} \quad (4.3)$$

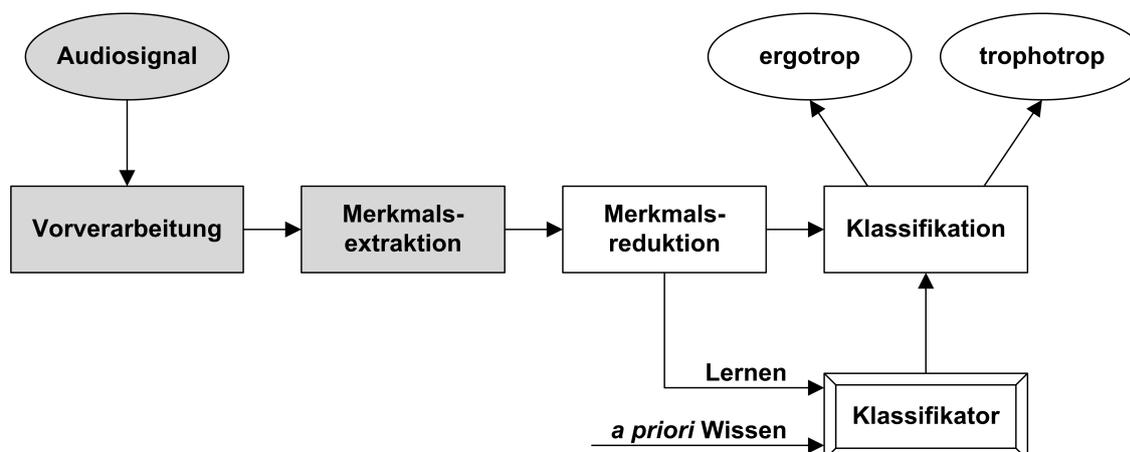


Abb. 4.9: Schema Merkmalsextraktion und Klassifizierung

Da die physiologische Wirkung unabhängig davon ist, mit welchem Ohr der Schall gehört wird, werden alle Signale durch Mittelwertbildung beider Kanäle in Mono transformiert, um so die Hälfte des Speicherplatzes und der Rechenzeit zu sparen. Etwa im rhythmischen Bereich hat zudem die Höhe der Abtastrate keine große Bedeutung, weshalb dort einige Merkmalsextraktions-Algorithmen mit einer verringerten Abtastrate von 22,05 kHz oder 11,025 kHz arbeiten. Bei Merkmalen, die die Harmonik der Musik untersuchen, ist es hingegen sehr wichtig, die volle Signalqualität und damit die gesamte Bandbreite einer Audio-CD von 5 bis 20 kHz nutzen zu können.

Die hier entstehenden Datenmengen sind für viele der komplexeren Extraktions-Algorithmen auf einem normalen PC nur schwerlich zu bewältigen, deshalb werden die Musikstücke zur Merkmals-Extraktion in mehrere Teilabschnitte zerteilt. Im Regelfall werden dabei zwei Sekunden lange Abschnitte analysiert, je nach Merkmal sind aber auch Abschnittslängen von sechs oder zwölf Sekunden notwendig. So können etwa rhythmische Strukturen – also ob es sich etwa um einen beschwingten Walzer oder einen gewichtigen Marsch handelt – sowohl vom menschlichen Hörsinn, als auch von einem Extraktions-Algorithmus erst im Kontext von mehreren Sekunden erschlossen werden.

Wie bei der Genreanalyse, einer vergleichbaren Problemstellung, üblich, fallen zudem die ersten und letzten zehn Sekunden heraus, da diese oft nicht charakteristisch für das Musikstück stehen; man denke etwa an eine Verlangsamung des Tempos in den letzten Takten.

Merkmale, die sich auf die Dynamik innerhalb eines Musikstückes beziehen, werden immer in Bezug zu einer anderen Größe wie etwa der totalen Lautheit gesetzt, was dem Vorgang einer Normalisierung weitgehend entspricht.

Für viele Merkmale ist es notwendig, die im Zeitsignal vorhandenen Frequenzen zu kennen. Zu diesem Zweck wird das Zeitsignal $s(t)$ mit der Diskreten Fourier-Transformation (DFT) in den Spektralbereich

$$s(t) \circ \bullet S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-jk \frac{2\pi}{N}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (4.4)$$

transformiert. Da die Fourier-Transformierte grundsätzlich keine Rückschlüsse auf das zeitliche Auftreten der Frequenzen zulässt, wird hier die Short-Time-Fourier-Transformation (STFT) angewandt. Dazu wird das Zeitsignal in kleine, sich überlappende Fenster zerteilt. Um den Leakage-Effekt – ein „Verschmieren“ des Spektrums, wenn die Fensterbreite nicht exakt ein Vielfaches der Periodendauer ist – zu verringern, wird dafür die Hamming-Fensterfunktion verwendet, die so gestaltet ist, dass das Signal zu Beginn und Ende des Fensters ein- beziehungsweise ausgeblendet wird und keine steilen Flanken entstehen. Durch die blockweise Analyse entsteht eine zeitliche Information der im Signal enthaltenen Frequenzen, die etwa in Spektrogrammen (siehe Abbildung 4.7) darstellbar ist.

Aufgrund der Unschärferelation in der Signalverarbeitung sind Frequenz- und Zeitauflösung komplementäre Größen, je kürzer die Blocklänge T_{Fenster} im Zeitbereich, desto geringer wird die Frequenzauflösung

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{1}{N \cdot T_s} = \frac{1}{T_{\text{Fenster}}} \quad (4.5)$$

mit der Abtastdauer T_s beziehungsweise Abtastfrequenz f_s und der Fensterlänge N . Für diese Arbeit wurde eine Zeitauflösung von 0,1 s und eine Frequenzauflösung von 10 Hz als Kompromisslösung verwendet. Das Problem liegt hier darin, dass 10 Hz im hohen Frequenzbereich sehr wenig sind – die beiden höchsten Tasten auf dem Klavier haben zum Beispiel einen Frequenzunterschied von über 200 Hz – im niederfrequenten Bereich sind 10 Hz aber ein musikalisches Intervall von über sechs Halbtönen.

Die komplexere Wavelet-Transformation könnte dieses Dilemma lösen. Für unseren Anwendungszweck ist das jedoch nicht zwingend notwendig: Hier geht es vor allem um einen relativen Vergleich zwischen den ergotrop und trophotrop wirkenden Musikstücken – wie groß die einzelnen Parameter auf einer absoluten Skala sind, ist irrelevant. Deshalb sind an dieser Stelle qualitative Abstriche zugunsten Praktikabilität

und Rechenzeit möglich. Zudem sind für die harmonischen Merkmale vor allem höhere Frequenzen entscheidend; im tiefen Bereich zählt primär die sogenannte Grundfrequenz des Klanges. Diese wird jedoch, wie in Abschnitt 5.2.1.4 beschrieben wird, über ein ganz anderes und wesentlich aufwendigeres Verfahren bestimmt.

Somit steht nun sowohl der zeitliche Verlauf der Signalamplitude, als auch ein zeitaufgelöstes Spektrum als Datenbasis für die Merkmalsextraktions-Algorithmen zur Verfügung.

Statistische Aufbereitung und Vorverarbeitung

Da später die einzelnen Merkmale gleichzeitig auch auf ihre Qualität für die Klassifizierung blutdrucksenkender Musik überprüft werden sollen, ist es zunächst notwendig, die angewandten statistischen Methoden kurz zu beschreiben. Aus den Algorithmen berechnet sich für jedes Merkmal pro Musikstück eine Kennzahl. Je nach Merkmal kann diese im Millionen- oder im Mikrobereich liegen, positiv, negativ oder beides sein. Deshalb wird zunächst auf alle Merkmale die Z-Score-Transformation

$$Z\text{Merkmal} = \frac{\text{Merkmal} - \text{Mittelwert}}{\text{Standardabweichung}} \quad (4.6)$$

angewandt und damit ein Datensatz mit einem *Mittelwert* = 0 und einer *Standardabweichung* = 1 erzeugt. Dadurch wird keinerlei statistische Information gewonnen oder verloren, jedoch vereinfacht sich der Umgang mit den Merkmalen in der Praxis, da sich die Vergleichbarkeit von Merkmalen und Gewichtungskoeffizienten verbessert.

Trennkraft der Merkmale

Zur Beurteilung der Trennschärfe, das heißt, wie scharf oder unscharf jedes Merkmal für sich ergotrope und trophotrope Musik trennt, wird mit einer univariaten Varianzanalyse das von Samuel S. Wilks entwickelte Wilks'sche Lambda

$$\Lambda = \frac{\text{nicht erklärte Streuung}}{\text{gesamte Streuung}} = \frac{\sum(x_{i,ergo} - \bar{x}_{ergo})^2 + \sum(x_{i,tropho} - \bar{x}_{tropho})^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \quad (4.7)$$

als Gütekriterium verwendet [124]. Dabei ist die nicht durch das Merkmal erklärte Streuung die jeweilige Varianz innerhalb der beiden Gruppen und wird als Summe der Abstandsquadrate aller zur Gruppe gehörigen Kennwerte zum jeweiligen Gruppenmittelwert \bar{x}_{ergo} oder \bar{x}_{tropho} berechnet. Die gesamte Streuung ist analog dazu die Summe

der Abstandskvadratrate aller Kennwerte x_i vom Merkmalsmittelwert \bar{x} , der nach der oben beschriebenen Normierung identisch null ist.

Damit liegt der Wertebereich von Λ zwischen null und eins; je größer die Homogenität (also je kleiner die Streuung) innerhalb einer Gruppe und je größer der Abstand zwischen den beiden Gruppen (also die Gesamtstreuung), desto mehr nähert sich Λ null. In Abbildung 4.10 sind vier einfache Verteilungen mit dem jeweiligen Wilks'schen Lambda gegeben; nur für Λ , die deutlich kleiner sind als eins, ist eine gute Klassifizierung möglich. In der Tabelle aller Merkmale in Anhang C ist das Wilks'sche Lambda jeweils mit angegeben.

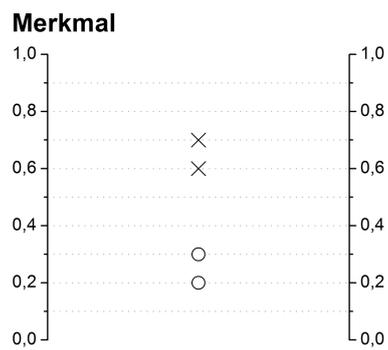
Irrtumswahrscheinlichkeit und Signifikanz

Bevor ein Merkmal in die Gesamtbetrachtung einfließt, muss noch getestet werden, ob es überhaupt im statistischen Sinne bedeutungsvoll, also signifikant ist. Signifikant bedeutet in der Statistik, dass die Wahrscheinlichkeit eines zufälligen Zustandekommens des Ergebnisses gering ist.

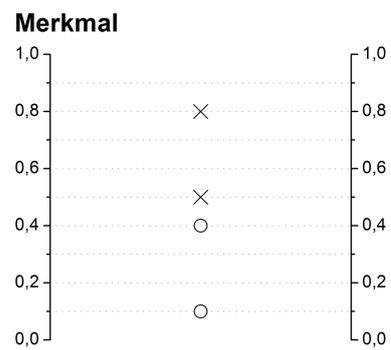
Für jedes Merkmal wird deshalb die Irrtumswahrscheinlichkeit p berechnet – also die Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Test ein durch dieses Merkmal klassifiziertes Musikstück der falschen Gruppe zugeordnet wird. Sie ist für alle Merkmale in der Tabelle in Anhang C angegeben.

Das Signifikanzniveau – also die gerade noch tolerierbare Irrtumswahrscheinlichkeit – kann abhängig von der Anwendung frei gewählt werden. Je schwerwiegender die Konsequenzen einer falschen Eingruppierung in die erste Klasse sind, umso geringer sollte das Signifikanzniveau gewählt werden. Dabei steigt dann allerdings die Gefahr, die Gegenhypothese, also die Eingruppierung in die zweite Klasse, zu negieren, obwohl sie eigentlich richtig wäre.

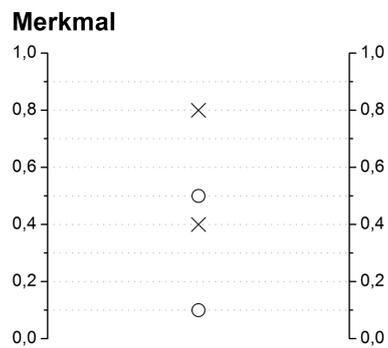
Da von einer falschen Eingruppierung nicht-blutdrucksenkender Musik keine ernsthaften Gefahren ausgehen, solange die Musiktherapie nicht als einzige Therapie bei Hochrisiko-Patienten eingesetzt wird, was nicht Ziel dieser Arbeit ist, kann das Signifikanzniveau recht frei gewählt werden. In der Literatur wird immer wieder ein Signifikanzniveau von fünf Prozent genannt [69]. Das würde bedeuten, dass sich bei einer normalverteilten Zufallsgröße der Wert um mehr als die doppelte Standardabweichung vom Erwartungswert unterscheiden müsste.



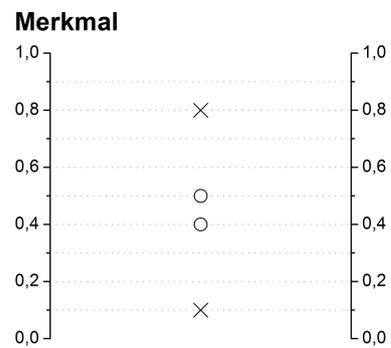
(a) $\Lambda = 0,059$



(b) $\Lambda = 0,36$



(c) $\Lambda = 0,64$



(d) $\Lambda = 1$

Abb. 4.10: Vier Beispiele für Wilks' Lambda

Von den insgesamt über vierhundert Merkmalen, die in Kapitel 5.2.1 besprochen werden, bleiben etwa zweihundert unter diesem Schwellenwert; unter dem hochsignifikanten Niveau von 0,1 Prozent bleiben immerhin noch 170 Merkmale. Da für den Klassifikator nur wesentlich weniger Merkmale herangezogen werden können (vergleiche Abschnitt 5.2.2.3), ist die Signifikanz vor allem dazu geeignet, schon vorab die Menge an Merkmalen zu verringern. Merkmale mit einer größeren Irrtumswahrscheinlichkeit als fünf Prozent (respektive einer kleineren Vertrauenswahrscheinlichkeit als 95 Prozent) werden deshalb aussortiert und im weiteren Verlauf nicht mehr einbezogen – alle anderen werden als statistisch signifikant betrachtet.

Korrelation

Die Korrelation misst den Grad der (linearen) Abhängigkeit zwischen zwei Merkmalen [83]. Für einige Klassifikationsverfahren wie die Diskriminanzanalyse ist es ungünstig, stark korrelierte Variablen mit einzubeziehen, da das Ergebnis verfälscht werden könnte. Deshalb ist es wichtig, die Korrelationen zwischen den Merkmalen zu untersuchen und gegebenenfalls Merkmale für die Klassifizierung auszuschließen.

Dazu wird die Korrelationsmatrix mit den Korrelationen der Klassifikationsvariablen innerhalb der Klassen als Mittel der separaten Matrizen für beide Klassen berechnet. Das ergibt einen Korrelationskoeffizienten⁶ $\rho \in [-1, 1]$ zwischen allen Merkmalen. Ein Wert von 0 bedeutet, dass beide Variablen nicht linear voneinander abhängen, 1 oder -1 bedeuten einen vollständig positiven respektive negativen linearen Zusammenhang. Wichtig für die Auswertung ist, dass die korrelierenden Merkmale in einen sachlogischen Zusammenhang stehen, ansonsten kann eine inhaltliche „Nonsens-Korrelation“ (wie etwa Anzahl der Störche und Geburtsrate) oder eine Scheinkorrelation detektiert werden [83]. Letztere entsteht, wenn zwei voneinander unabhängige Merkmale jeweils mit einem dritten Merkmal korreliert sind, wodurch sich auch eine scheinbar hohe Korrelation zwischen den ersten beiden Merkmalen ergibt.

Genau dieser Fall tritt mit der Klassenzugehörigkeit zu den ergotropen oder trophotropen Stücken als drittem Merkmal sehr oft auf, denn selbstverständlich ist es Ziel der Merkmalsextraktion, verschiedene Merkmale zu finden, die möglichst übereinstimmende Ergebnisse bezüglich der blutdrucksenkenden Wirkung des Musikstückes liefern, also korrelieren sollen.

⁶ oder auch Korrelationsfaktor

So korrelieren die beiden Merkmale *Inharmonicity* ($\Lambda = 0,74$) und *Delta Spectrum Magnitude 1* ($\Lambda = 0,67$) mit einem Korrelationsfaktor von $\varrho = 0,96$ sehr stark, obwohl sie von der Berechnung und Bedeutung in keiner Weise zusammenhängen. Dahingegen handelt es sich bei dem etwas geringeren, aber immer noch sehr hohen Korrelationsfaktor $\varrho = 0,88$ zwischen *Delta Spectrum Magnitude 1* und *Delta Spectrum Magnitude 2* ($\Lambda = 0,65$) um eine echte Korrelation, da es sich hier lediglich um zwei Berechnungsweisen desselben Sachverhaltes handelt.

Während im ersten Fall beide Variablen weiterhin berücksichtigt werden, wird im zweiten Fall die *Delta Spectrum Magnitude 1* gestrichen, da sie von beiden den höheren, also schlechteren Λ -Wert aufweist.

In Kapitel 5.2.1 werden insgesamt 410 Kennzahlen implementiert, was die Berechnung einer 410×410 -Korrelationsmatrix erfordern würde, aus technischen Gründen aber nicht mehr möglich ist. Zudem wäre die Auswertung der knapp 170 000 Einträge extrem aufwendig. Deshalb wurde auf die Berechnung und Auswertung der Korrelationen aller Merkmale in diesem ersten Schritt verzichtet. Bei den Klassifikationsverfahren in Kapitel 5.2.2 werden dann selektiv die verwendeten Variablen untersucht.

5 Erprobung und Untersuchungen

5.1 Erprobung des Gesamtsystems

Basierend auf den zuvor beschriebenen Konzepten und Komponenten wurde zusammen mit der DRV Klinik Bayern Süd, kurz Klinik Höhenried, die akustische Biofeedback-Therapie als telemedizinische Interventionsmöglichkeit bei primärer Hypertonie sowie die Funktionen und Praktikabilität des Virtual Lab getestet.

Die Hypothesen waren:

- Das Virtual Lab wird als technische telemedizinische Gesundheitsplattform akzeptiert.
- Die akustische Intervention senkt die Blutdruckwerte signifikant.

Im Rahmen einer prospektiven Beobachtungsstudie wurde das neue musiktherapeutische Konzept an 20 hypertonen Patienten erprobt.

Alle an der Studie teilnehmenden Testpersonen sollten über einen mehrwöchigen Zeitraum täglich, jeweils morgens und abends, ihre Blutdruckwerte erfassen. Um den normalen durchschnittlichen Blutdruck zu ermitteln, wurde jeder Patient dazu angehalten in einer Einführungswoche (Baseline-Woche) nur Einzelmessungen, ohne Musikeinsatz, durchzuführen. Anschließend sollten sich die Patienten nach der ersten Blutdruckmessung mittels des Mobiltelefons bestimmte Musikstücke anhören und danach erneut ihren Blutdruck messen. Auch dieser Ablauf sollte jeweils morgens und abends durchgeführt werden.

Die Gewinnung entsprechender Personen gestaltete sich nicht ganz einfach, da die mehrwöchige tägliche Prozedur einen hohen Zeitaufwand ohne entsprechende Vergütung bedeutet. Daneben sollten die Messungen natürlich möglichst regelmäßig und gewissenhaft durchgeführt werden.

Aus diesem Grund wurde die Studie um unabhängige Probanden erweitert, die sich in ihrem normalen Alltag bewegen. Auch hier wurde in erster Linie auf einen chronisch erhöhten Blutdruck der Teilnehmer geachtet. Nichtsdestotrotz nahmen auch zwei Hypotoniker an der Studie teil, um zu sehen, ob der ohnehin sehr niedrige Blutdruck durch die Musik noch weiter abgesenkt werden kann.

Methodik und Setting

Alle an der Studie teilnehmenden Testpersonen haben während ihres mehrwöchigen Reha-Aufenthaltes parallel zu der normalen psychosomatischen Behandlung, täglich - jeweils morgens und abends - ihre Blutdruckwerte telemedizinisch selbst erfasst. In Kapitel 4.1 wurde die technische Ausstattung der Probanden ausführlich beschrieben. Um den normalen durchschnittlichen Blutdruck zu ermitteln, war jeder Patient dazu angehalten in einer Einführungswoche (Baseline-Woche) nur Einzelmessungen ohne Musikeinsatz durchzuführen. Anschließend sollten sich die Patienten nach der ersten Blutdruckmessung mittels des Mobiltelefons bestimmte klassische Musikstücke anhören und danach erneut ihren Blutdruck messen. Auch dieser Ablauf wurde jeweils morgens und abends durchgeführt. Mit einem abschließenden Fragebogen wurden die individuellen Bewertungen der akustischen Therapie erfasst.

Die Probanden wurden persönlich in die Bedienung des Messkits eingewiesen. Des Weiteren erhielten sie eine Patienteninformation und eine damit verbundene Einverständniserklärung sowie eine Datenschutzerklärung. Die stationären Probanden in der Klinik wurden medizinisch und technisch betreut. Den ambulanten Probanden wurde dagegen nur eine technische Betreuung zuteil.

Auswertung

Die anschließende Analyse der Blutdruckdaten wurde mittels unterschiedlicher Methoden und Grafiken durchgeführt. Die Grafiken wurden größtenteils mit der Softwarelösung SPSS generiert.

Um zu prüfen, ob die Blutdruck-Datensätze der Patienten normalverteilt sind, existieren verschiedene Testverfahren, wie der Kolmogorov-Smirnov-Test, der auch bei kleineren Stichprobenumfängen anwendbar ist. Der Test untersucht die maximale Differenz zwischen der empirischen und der erwarteten Verteilung und berechnet anhand

dieser eine Prüfgröße. Durch Auswertung des Signifikanzniveaus kann entschieden werden, ob die Stichprobe eine Normalverteilung besitzt oder nicht. Dass die Stichprobe aus einer Grundgesamtheit stammt, die normalverteilt ist, wird als Nullhypothese definiert. Liegt das Signifikanzniveau unter 5 %, wird die Nullhypothese verworfen, andernfalls als weiterhin gültig betrachtet.

Zusätzlich zu dem Kolmogorov-Smirnov-Test wurde noch ein Quantile-Quantile-Plot, kurz Q-Q-Plot, erstellt. Dabei handelt es sich um eine grafische Analyse- und Vergleichsmöglichkeit, ob Daten aus einer normalverteilten Grundgesamtheit stammen. Dazu werden die empirischen Werte, die sich aus der Auswertung des Datensatzes ergeben, in einem Koordinatensystem eingetragen und mit denen einer Normalverteilung verglichen.

Der Q-Q-Plot ist dabei in zwei Streudiagramme aufgeteilt. Im ersten Diagramm streuen die Werte um eine Gerade. Je mehr Punkte auf oder nahe der Geraden liegen, desto größer ist die Übereinstimmung der Verteilung des ursprünglichen Datensatzes mit einer Normalverteilung. Das zweite Diagramm dient zur weiteren Überprüfung der durch die erste Grafik gewonnenen Erkenntnis. Die Verteilung der Werte im Koordinatensystem sollte möglichst unsystematisch und unregelmäßig sein. Kristallisieren sich keine systematischen Anordnungen heraus, ist von einer Normalverteilung der Werte auszugehen.

Die Auswertungen der Daten mittels des Kolmogorov-Smirnov-Tests und des Q-Q-Plots zeigen, dass die Blutdruckwerte der Patienten als normalverteilt angenommen werden können. Auf eine Einzelauswertung wird hier verzichtet.

Vor Durchführung bestimmter Signifikanztests sollte zusätzlich zur Normalverteilung noch die Homogenität der Varianzen überprüft werden. Dafür eignet sich ein so genannter Levene-Test. Ähnlich wie beim Kolmogorov-Smirnov-Test wäre es wünschenswert die Nullhypothese, die in diesem Fall von einer Homogenität der Varianzen ausgeht, beizubehalten. Das berechnete Signifikanzniveau sollte demnach nicht unter die Grenze von 5 % fallen. Dies ist bei den Blutdruckdaten der Patienten der Fall. Einzig bei den Werten einer Person (Privater Proband 1) wird das Signifikanzniveau von 5 % knapp unterschritten. Auf die Aussagekraft des t-Tests hat diese geringfügige Abweichung keinerlei Auswirkungen.

In einem ersten Schritt erfolgte ein Vergleich der Mittelwerte, die sich aus den Blutdruckwerten der Baseline-Woche, sowie der ersten Messung (vor dem Musikhören) und der zweiten Messung (nach dem Musikhören) errechnen.

Zur Anschauung sind in Abbildung 5.1 exemplarisch die Werte eines Patienten (Proband 12) aus dem Pool der Studienteilnehmer aufgeführt. Es handelt sich dabei um eine 50 Jahre alte, weibliche Patientin, deren Bluthochdruck mit einem Calciumantagonisten und einem ACE-Hemmer behandelt wird. Die Medikamente wurden aus gesundheitlichen Gründen während der Musiktherapie nicht abgesetzt, wodurch eine zusätzliche Beeinflussung des Blutdrucks durch die Musik insgesamt höher zu bewerten ist.

Hinter den Mittelwerten (MW) ist in Klammern die Standardabweichung (SD) abgebildet, die als Maß für die Streuung von Daten gilt. Durch die Differenz der Mittelwerte der ersten und der zweiten Messung ergibt sich der durchschnittliche Rückgang des Blutdrucks der durch die Musik erreicht werden konnte. Je stärker der Rückgang desto positiver wurde der Blutdruck durch die nicht medikamentöse Therapie mit Musik beeinflusst. In diesem Fall konnte der systolische Blutdruck durchschnittlich um 5,64 mmHg, der diastolische Blutdruck um 3,20 mmHg gesenkt werden. Dies stellt ein sehr gutes Ergebnis dar.

	Systolischer Blutdruck (mmHg)	Diastolischer Blutdruck (mmHg)	Puls
MW1: Baseline (SD)	123,69 (8,81)	77,00 (3,06)	73,13 (6,73)
MW2: Erste Messung (SD)	135,12 (10,06)	79,96 (5,90)	59,48 (6,11)
MW3: Zweite Messung (SD)	129,48 (8,71)	76,76 (5,93)	55,52 (3,744)
Differenz: MW3 – MW2:	-5,64	-3,20	-3,96

Messdaten-Auswertung Patient 12

Abb. 5.1: Auswertung der Messdaten von Proband 12

Auf Basis der Blutdruckdaten wurden sowohl für den systolischen Blutdruck (rot) als auch für den diastolischen Blutdruck (blau) Boxplot-Grafiken generiert. Auch hier erfolgte jeweils eine Unterteilung in Prä- und Post-Werte bezüglich des Musikhörens.

Boxplot-Grafiken eignen sich gut zur grafischen Darstellung von verschiedenen Maßen eines Datensatzes. Die oberen und unteren horizontalen Striche (Whisker) kennzeichnen die Maximal- bzw. Minimalwerte, die Linie, die die mittige Box unterteilt, stellt den Medianwert dar. Extremwerte werden herausgerechnet und gesondert, durch rote Kreise, dargestellt. In den Abbildungen 5.2 und 5.3 sind die Boxplots, die aus den Blutdruckdaten der weiblichen Patientin ermittelt wurden, abgebildet. Die Boxplots der zweiten Messung befinden sich beide in einem niedrigeren Druckbereich. Sowohl die Maximalwerte als auch der Median des systolischen und des diastolischen Blutdrucks gingen deutlich zurück. Die Abnahme der Boxgröße deutet zusätzlich auf einen Rückgang der Streuung der Blutdruckwerte hin. Dies ist insbesondere beim systolischen Blutdruck klar ersichtlich.

In Abbildung 5.4 und 5.5 sind Delta-Werte, die sich aus den Messungen ergeben, aufgelistet. Eine Betrachtung der Grafiken validiert das gute Ergebnis. Nahezu alle Delta-Werte sind negativ. Dabei hatte die Musik, wie zuvor bereits ermittelt, einen etwas größeren Einfluss auf den systolischen Blutdruck. Innerhalb der 25 Messpaare konnte der systolische Blutdruck meistens um Werte zwischen 5 und 10 mmHg gesenkt werden. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch beim diastolischen Blutdruck.

In Abbildung 5.6 ist die zeitliche Entwicklung des Blutdrucks wiedergegeben. Dort ist zu sehen, dass beide Trendlinien durchgehend unter der Null-Linie bleiben und zusätzlich einen leichten Abwärtstrend aufweisen. Der Blutdruck sprach demnach mit fortschreitender Therapiedauer besser auf die musikalische Stimulation an.

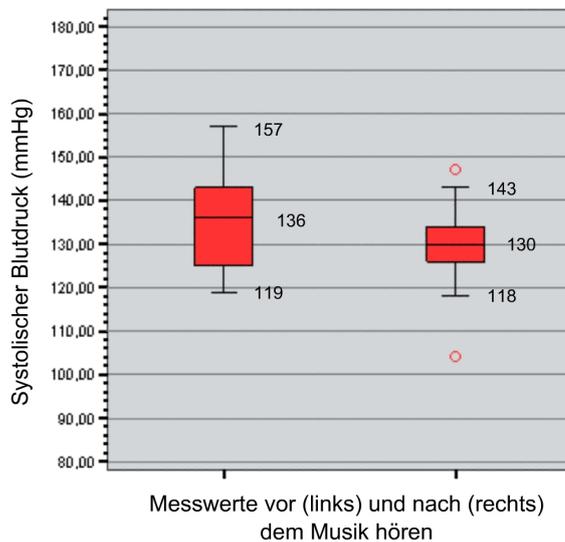


Abb. 5.2: Boxplot für Proband 12, systolischer Blutdruck

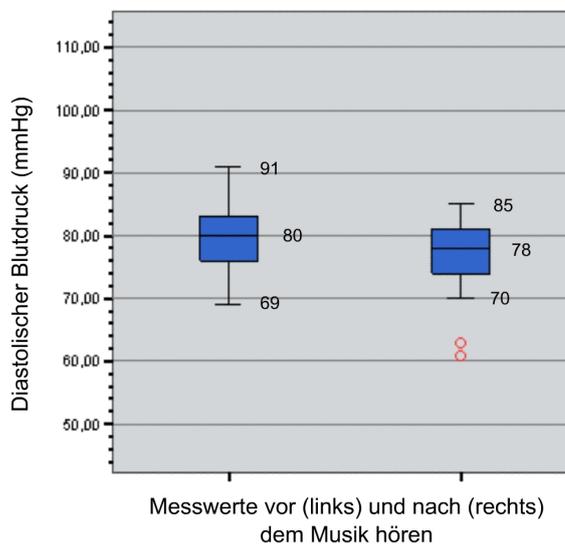


Abb. 5.3: Boxplot für Proband 12, diastolischer Blutdruck

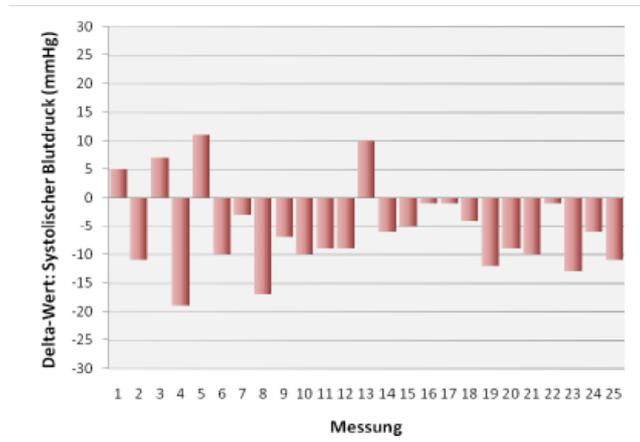


Abb. 5.4: systolische Delta-Werte (Post-Prä) Blutdruckmessung vor und nach dem Musikhören von Proband 12

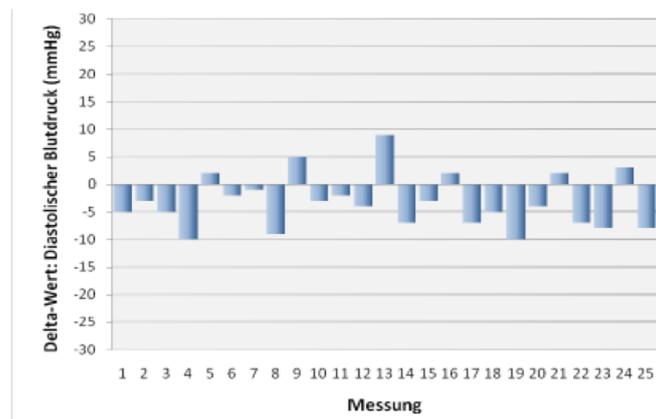


Abb. 5.5: diastolische Delta-Werte (Post-Prä) Blutdruckmessung vor und nach dem Musikhören von Proband 12

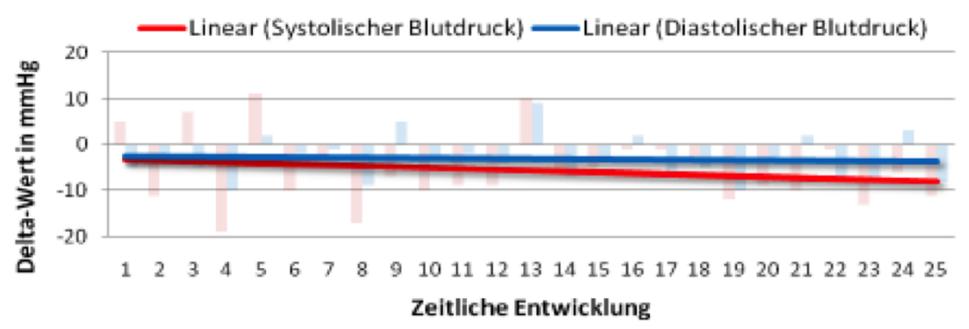


Abb. 5.6: Trendlinie von Proband 12

Messdatenauswertung

Für die Untersuchung der Studie wurden nur vollständige und möglichst lückenlose Datensätze verwendet. Aus diesem Grund konnten die Daten von etwa einem Viertel der Patienten nicht berücksichtigt werden. Nach ausführlicher Vorauswertung der Datensätze, blieben insgesamt 14 Versuchsteilnehmer unterschiedlichen Alters und Geschlechts übrig. Die Blutdruckwerte dieser Personen wurden analysiert und ausgewertet. Darunter waren 9 Personen aus der Klinik in Höhenried und 5 private Probanden. Durch die detaillierte Auswertung der Blutdruckdaten jedes einzelnen Patienten mittels der vorgestellten Grafiken konnten Rückschlüsse auf die Wirksamkeit der Musik gezogen werden.

Bei über 50 % der in der Studie involvierten Hypertoniker wurden gute Ergebnisse durch die Musiktherapie erzielt. Dadurch wird das Potential einer nicht medikamentösen Behandlung von Bluthochdruck mittels Musik bestätigt und liegt deutlich über dem Placeboeffekt. Das Ergebnis der restlichen Patienten wurde, aufgrund der starken Schwankungen oder wegen einer unterschiedlichen Entwicklung des systolischen und diastolischen Blutdrucks, als neutral eingestuft. Einzig bei einem Patienten ergab sich ein negatives Gesamtbild, da dessen Blutdruckwerte im Mittel eher zunahm. Ein Indiz für das schlechte Ergebnis der Musiktherapie bei dieser Person könnte die Abneigung gegenüber der verwendeten Musik sein. In Tabelle 5.7 ist die Auswertung zusammengefasst.

	Angeworbene Patienten	Auswertbare Datensätze	Einteilung des Ergebnisses		
			<i>Positiv</i>	<i>Neutral</i>	<i>Negativ</i>
Klinik Höhenried	14	9	4	4	1
Private Probanden	6	5	3	2	0
Insgesamt	20	14	7	6	1

Abb. 5.7: Zusammenfassung der Auswertung

Um die Erkenntnisse, die sich durch die Einzelauswertungen ergaben, zu validieren erfolgte zusätzlich die Durchführung eines Signifikanztests. Dabei handelt es sich um einen Hypothesentest, in dem eine vorab definierte Nullhypothese (H_0) einer Alternativhypothese (H_1) gegenübergestellt wird. Auf dieser Basis erfolgt die Berechnung einer Wahrscheinlichkeit, mit der sich eine Aussage treffen lässt, ob die Nullhypothese als richtig oder falsch angenommen werden kann. Dies geschieht anhand eines Vergleichs der berechneten Wahrscheinlichkeit mit dem Signifikanzniveau, dass üblicherweise auf $\alpha = 5\%$ festgelegt wird. Ergibt der Signifikanztests einen Wert unter dem Signifikanzniveau erfolgt eine Zurückweisung von H_0 , was mit einer Annahme von H_1 gleichzusetzen ist.

Die Blutdruckdaten wurden daraufhin analysiert und geprüft, ob sich statistisch nachweisen lässt, dass der Unterschied des Blutdrucks zwischen der ersten und der zweiten Messung, auf systematischen Differenzen basiert und nicht durch Zufall zustande gekommen ist. Die Nullhypothese besagt, dass kein signifikanter Unterschied zwischen der ersten und zweiten Blutdruckmessung besteht, sondern die Abweichungen rein zufällig zustande gekommen sind. Dies wurde mit einem sogenannten t-Test überprüft.

Der t-Test liefert für den systolischen Blutdruck eine Signifikanz $\alpha^* = 0,013$ oder 1,3 %. Da dieser Wert unter dem üblichen Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$ liegt, kann die Nullhypothese (H_0) verworfen werden. Es erfolgt eine Annahme der Alternativhypothese (H_1), die besagt, dass ein signifikanter Unterschied zwischen den Messungen vor und nach dem Musikhören besteht. Gleiches gilt für den diastolischen Blutdruck, dessen berechneter Signifikanzwert mit 0,003 noch geringer ausfällt. Es lässt sich also statistisch mit hoher Wahrscheinlichkeit nachweisen, dass die Musik Auswirkungen auf den Blutdruck hat.

Die detaillierte Einzelfallbetrachtung aller Probanden inklusive aller zugehöriger Daten kann im Datenarchiv des Heinz Nixdorf-Lehrstuhls für Medizinische Elektronik eingesehen werden.

Befragungen

Für den Erfolg neuartiger Systeme ist eine hohe Akzeptanz bei Ärzten und Patienten von entscheidender Bedeutung. Die Praxistauglichkeit der einzelnen Komponenten des Messkits wurde durch die an der Studie teilnehmenden Patienten evaluiert. Dazu hatten die Studienteilnehmer die Möglichkeit, nach Abschluss ihrer Therapie

einen vierseitigen Fragebogen auszufüllen, in dem sie ihre Erfahrungen schildern und die einzelnen Komponenten des Systems bewerten konnten. Die Auswertung der einzelnen Fragen erlaubt Rückschlüsse, inwiefern die Bestandteile der THPM-Plattform bereits ausreichend praxisgerecht konzipiert wurden. Das Blutdruckmessgerät und das gekoppelte Mobiltelefon sind wichtige Komponenten des Messkits. Für den täglichen Gebrauch sind eine hohe Benutzerfreundlichkeit und eine einfache Bedienbarkeit von essentieller Bedeutung.

Umso erfreulicher ist es, dass beide Geräte von den Studienteilnehmern sehr positiv bewertet wurden. Der Großteil der befragten Personen vertraute den Messergebnissen und sieht zudem die Vorteile und Möglichkeiten die sich durch Telemedizinssysteme bieten. Auch von der technischen Stabilität des Systems waren nahezu alle Patienten und Ärzte positiv angetan. So traten innerhalb der Studie selten technische Probleme oder Störungen auf. Dies zeigt, dass die Komponenten des Telemedizinlabors für einen realen Praxiseinsatz geeignet sind.

Bei der in der Studie verwendeten Musik handelt es sich um klassische Kompositionen. Die Einstellung der Patienten zu klassischer Musik war recht unterschiedlich. Das gute Resultat der Therapie zeigt allerdings, dass persönliche Präferenzen, zumindest in einem gewissen Maße, irrelevant für den therapeutischen Effekt sind.

Die Erprobung des mit den Biofeedback-Funktionen erweiterten, virtuellen Labors mit hypertonen Patienten der Klinik Höhenried erzielte sowohl in der Praktikabilität als auch beim Therapieerfolg gute Ergebnisse [123].

Wichtige Erkenntnisse dabei waren, dass die Versuchspersonen zum einen kürzere Musikstücke und zum anderen mehr Abwechslung bei der Musikauswahl wünschen und dass generell vom Patienten selbst gewählte Stücke die Compliance, also Therapie-treue, erhöhen.

5.2 Ermittlung „überoptimaler“ Interventionssequenzen

Ziel ist deshalb die systematische Ermittlung der gemeinsamen musikalischen Eigenschaften und Merkmale blutdrucksenkender Musikstücke, um so die für den Blutdruck wichtigen Regelungsmechanismen weiter zu entschlüsseln.

Aus dieser Kenntnis wird ein Klassifikator entwickelt, der es ermöglicht, beliebige, von Patienten gewünschte Musikstücke auf ihre blutdrucksenkende Wirkung zu bewerten.

Zudem soll ein zeitlich aufgelöster Qualifikator den Verlauf relevanter Merkmale bewertbar machen. So kann festgestellt werden, welche Passagen im Stück besonders gut wirken (überoptimale Sequenzen) und sich damit ideal für die Verwendung in der Biofeedback-Therapie eignen.

5.2.1 Merkmalsextraktion

Um die Vielzahl der extrahierten musikalischen Merkmale übersichtlich darzustellen, ist zunächst eine Systematik notwendig. Neben der Möglichkeit, die Merkmale von statisch bis dynamisch anzuordnen, also die zeitlichen Eigenschaften eines Signals von den initialen Modellparametern zu trennen, nennt Geoffroy Peeters die Abstraktheit der extrahierten Merkmale als Unterscheidungskriterium [153]. Hier unterscheidet er vier Stufen:

- direkt aus der Signalform berechenbare Merkmale
- Merkmale, die nach einer Signaltransformation gewonnen werden können
- Merkmale, die auf einem signaltheoretischen Modell basieren, etwa einem Filtersystem
- Merkmale, die das Hörsystem des Menschen einbeziehen, zum Beispiel psychoakustische Modelle

Um die Anschaulichkeit und Nachvollziehbarkeit der Merkmale zu unterstützen, werden die Merkmale in dieser Arbeit nach ihrer naheliegendsten musikalischen Bedeutung gruppiert.

- **Psychoakustische Merkmale**

Hierzu zählen alle Merkmale, die auf psychoakustischen Modellen basieren, um den realen Höreindruck nachzubilden.

- **Dynamische Merkmale**

Hierunter sind alle Merkmale, die zeitliche Veränderungen des Signals beschreiben, zusammengefasst. Von der mehrere Sekunden dauernden Phrasierung bis hin zur Binnendynamik einzelner Notenwerte, etwa einem Staccato- oder Legato-Anschlag am Klavier.

- **Rhythmus-basierte Merkmale**

Die Merkmale, die versuchen, im Signal vorhandene zeitliche Periodizitäten zu erkennen und zu interpretieren, fallen in diese Gruppe.

- **Harmonische Merkmale**

Merkmale, die zu einem bestimmten Zeitpunkt im Signal vorhandene Frequenzen, deren Beziehungen und Verhältnisse zueinander analysieren.

- **Basismerkmale¹**

Eine Ausnahme bilden die Basismerkmale, unter die alle Eigenschaften gruppiert sind, denen keine unmittelbare musikalische Bedeutung zuzuschreiben ist. Es handelt sich in aller Regel um Merkmale, die sich direkt aus dem Amplitudenverlauf oder dem Spektrum ableiten.

Diese Einteilung ist jedoch systembedingt oft unscharf und uneindeutig, worauf in den einzelnen Fällen hingewiesen wird.

In den folgenden fünf Abschnitten werden alle untersuchten Merkmale dieser Gruppen kurz erläutert, gegebenenfalls hergeleitet und in ihrer statistischen Relevanz bewertet. Als Bezeichnung der Merkmale sind, wenn möglich, die in der Literatur verbreiteten und in der Regel englischen Begriffe gewählt. Außerdem wird ab und an kurz dargestellt, in wieweit sich ergotrope und trophotrope Musikstücke anhand einzelner Merkmale unterscheiden lassen und welche Besonderheiten sich in der jeweiligen Verteilung abbilden. Als Vergleichsgröße zwischen den Merkmalen dient das in Abschnitt 4.2.2.2 erklärte Wilks'sche Lambda.

Aus einigen Merkmalen werden neben dem zeitlichen Mittelwert noch weitere Kennzahlen abgeleitet. Dazu gehören von Fall zu Fall die Standardabweichung als Maß für die Schwankungsdynamik über der Zeit, der zeitliche Maximal- und Minimalwert und bei den aus [62] übernommenen Merkmalen auch der Median sowie der Range. In Anhang C ist eine Übersicht über alle Merkmale mit ihrer Trennkraft zu finden.

¹ In der Literatur auch als *baseline features* oder *low-level features* bekannt.

5.2.1.1 Psychoakustische Merkmale

In diesem Abschnitt werden alle Merkmale erklärt, die sich unmittelbar aus psychoakustischen Modellen berechnen lassen. Gleichzeitig werden sie auf ihre Qualität zur Erkennung blutdrucksenkender Musik überprüft und bewertet.

Tonhöhenempfindung

Die Tonhöhenwahrnehmung ist eine subjektive Empfindungsgröße. Deshalb ist es wichtig, die physikalische Frequenz auf eine gehörbezogene Frequenzskalierung abzubilden. Definitionspunkt ist hierbei nach Eberhard Zwicker der Ton C mit einer Frequenz von etwa 131 Hz. Ihm wird die Tonheit $Z = 131 \text{ mel}^2$ zugeordnet. Ein Ton der doppelten Tonheit $Z = 262 \text{ mel}$ wird doppelt so hoch wahrgenommen.

Bis 500 Hz stimmen die Skalen von Frequenz und Tonheit überein, darüber ist der Zusammenhang, wie Abbildung 5.8 zeigt, logarithmisch und entspricht mit dem Frequenzverhältnis 1:1,19 dem musikalischen Intervall einer kleinen Terz. Anschaulich gesprochen entspricht unterhalb von 500 Hz eine musikalische Oktave – also eine Verdopplung der Frequenz – der Verdoppelung der Tonhöhe, darüber werden die Tonhöhen kleiner wahrgenommen als die musikalischen Intervalle sind. Um eine Verdoppelung der Tonheit zu erreichen sind also zum Beispiel zwei oder mehr Oktaven notwendig. Insgesamt können etwa 640 Empfindungsstufen der Tonheit mit einer Breite von jeweils 3,8 mel wahrgenommen werden. Die Grenze für den oberen Hörbereich ist also etwa 2400 mel.

Eine andere Skala für die Tonheit ist die so genannte Bark-Skala. Die Umrechnung

$$1 \text{ Bark} = 100 \text{ mel} \quad (5.1)$$

ist denkbar einfach; der Zusammenhang mit der Frequenz kann durch

$$Z = 13 \cdot \arctan\left(\frac{0,76 \cdot f}{\text{kHz}}\right) + 3,5 \cdot \arctan\left(\frac{f}{7,5 \text{ kHz}}\right)^2 \quad (5.2)$$

approximiert werden [186]. Der Vorteil der von 1 bis 24 reichenden Bark-Skala ist, dass jeder Wert mit einer der 24 je 1 Bark breiten Frequenzgruppen korrespondiert. Wie in

² *mel* leitet sich von „Melodie“ ab

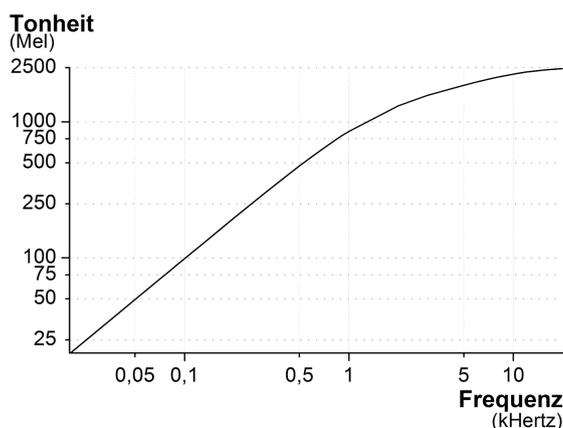


Abb. 5.8: Tonheit-Frequenz-Diagramm

Abschnitt 2.1.2.1 besprochen, wird der Schall eines jeden Geräusches im hörbaren Bereich durch die neuronale Verarbeitung in 24 Frequenzgruppen zerlegt und innerhalb von diesen gemeinsam ausgewertet. Anschließend werden die 24 Teilinformationen zusammengesetzt.

Abbildung 5.9 zeigt den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Maßen der Tonhöhe (Frequenz, Tonheit und die 640 wahrnehmbaren Tonhöhenstufen) und dem Ort auf der Basilarmembran, wo diese detektiert wird.

Da es für die auditive Wahrnehmung und den Höreindruck eine große Rolle spielt, ob zwei Töne in derselben oder in zwei verschiedenen Frequenzgruppe gehört werden, zerlegen viele der in Kapitel 5.2.1 vorgestellten Merkmale das Spektrum zunächst in die Frequenzgruppen, um diese danach einzeln weiter zu verarbeiten.

Lautstärkeempfindung

Die Lautheit als Empfindungsgröße für die Wahrnehmung der Lautstärke spiegelt mathematisch wider, dass der Gehörsinn die Intensität eines Schalls nicht nur in Abhängigkeit des Schalldruckes, sondern auch der Frequenz bewertet.

Als Definition wird einem Sinuston der Frequenz 1 kHz mit einem Schallpegel von 40 dB die Lautheit $N = 1 \text{ sone}^3$ zugeordnet. Wie laut relativ dazu einzelne Sinus-schwingungen einer bestimmten Frequenz und eines bestimmten Schallpegels wirken, zeigen die Kurven gleicher Lautstärke in Abbildung 5.10. Deutlich ist zu erkennen,

³ von sonare (lat.): klingen

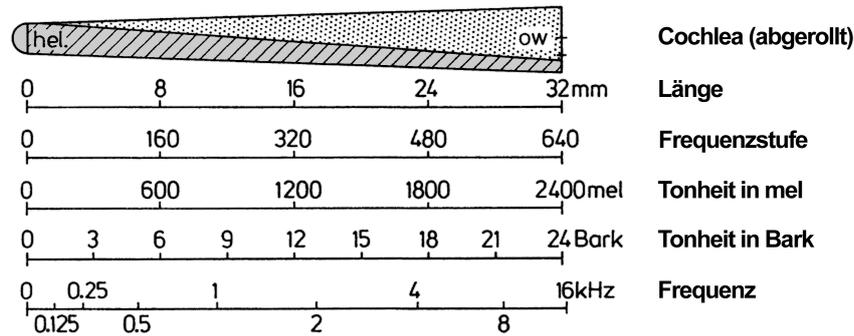


Abb. 5.9: Zusammenhang zwischen der Tonhöhe und dem detektierenden Ort auf der Basilarmembran [59]

dass in den für die Sprachübermittlung wichtigen Frequenzen von 0,2 bis 5 kHz für die gleiche Lautstärkeempfindung der geringste Pegel nötig ist. Die unterste Isolinie mit $N = 0$ sone beschreibt die Ruhehörschwelle, also den Schallpegel, der für einen gerade noch wahrnehmbaren Ton notwendig ist.

Lautheit

Wie in Abschnitt 5.2.1.1 beschrieben, hängt die wahrgenommene Lautstärke – die Lautheit – nicht nur vom Schalldruck, sondern auch von den im Klang vorkommenden Frequenzen ab.

Bei der Untersuchung der Lautheit mehrerer Töne ist feststellbar, dass sich die Lautstärken der Einzeltöne nur addieren, wenn deren Frequenzen einen ausreichenden Abstand zueinander haben und in verschiedenen Frequenzgruppen liegen. Deshalb ist es bei Klängen verschiedener, sich überlagernder Frequenzen wesentlich, jeden einzelnen Bark-Kanal getrennt auszuwerten und dort die Spezifische Lautheit N' in $\frac{\text{sone}}{\text{bark}}$ zu berechnen. Anschließend ist daraus die gesamte Lautheit des Klanges

$$N = \int_0^{24\text{Bark}} N' dz \quad (5.3)$$

berechenbar.

Wie bei einer Empfindungsgröße nicht anders zu erwarten, ist die Berechnung der Lautheit kompliziert, da neben Pegel, Frequenz und Frequenzgruppen noch weitere Größen und Effekte berücksichtigt werden müssen. Von mehreren Verfahren ist das in DIN 45631 normierte Verfahren von Eberhard Zwicker, das auf der Analyse von

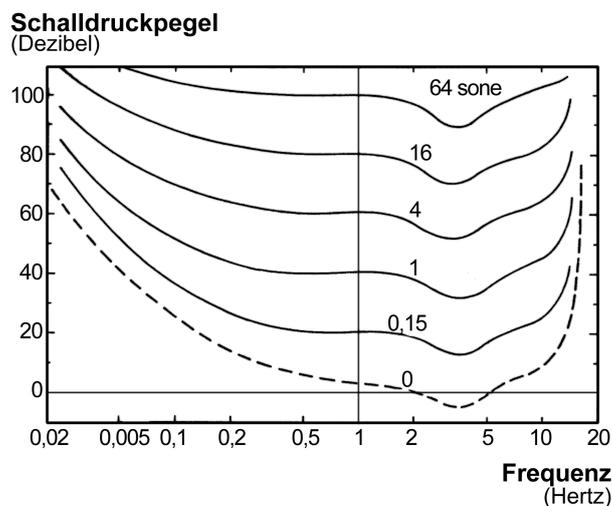


Abb. 5.10: Kurven gleicher Lautheit im Hörbereich, Hörschwelle bei 0 sone [212]

Terzpegeln basiert, am meisten verbreitet. Leider liefern auch die Modelle von Autoren, die sich auf diese Berechnungsmethode berufen, nicht immer dieselben Ergebnisse, was für unsere Anwendung jedoch kein großes Hindernis darstellt, da hier eher der relative Unterschied zwischen trophotropen und nicht-trophotropen Musikstücken als die absolute Lautheit wichtig ist.

Die Lautheitsberechnung der MA-Toolbox von Elias Pampalk [150] liefert sehr brauchbare Ergebnisse und wird in dieser Arbeit verwendet.

Wilks' Lambda für die Lautheit liegt bei 0,85, was einer sehr mäßigen Trennung von ergotroper und trophotroper Musik entspricht. Die Tendenz, dass ergotrope Musikstücke im Durchschnitt als lauter wahrgenommen und auch mit höherem Pegel aufgenommen werden, ist jedoch klar erkennbar.

Um eine bessere Einschätzung der Bedeutung von $\Lambda = 0,85$ zu ermöglichen, sind die Musikstücke in Abbildung 5.11a nach ihrer Lautheit geordnet dargestellt. Auch verschiedene statistische Untersuchungen des zeitlichen Lautheitsverlaufes liefern kaum bessere Ergebnisse.

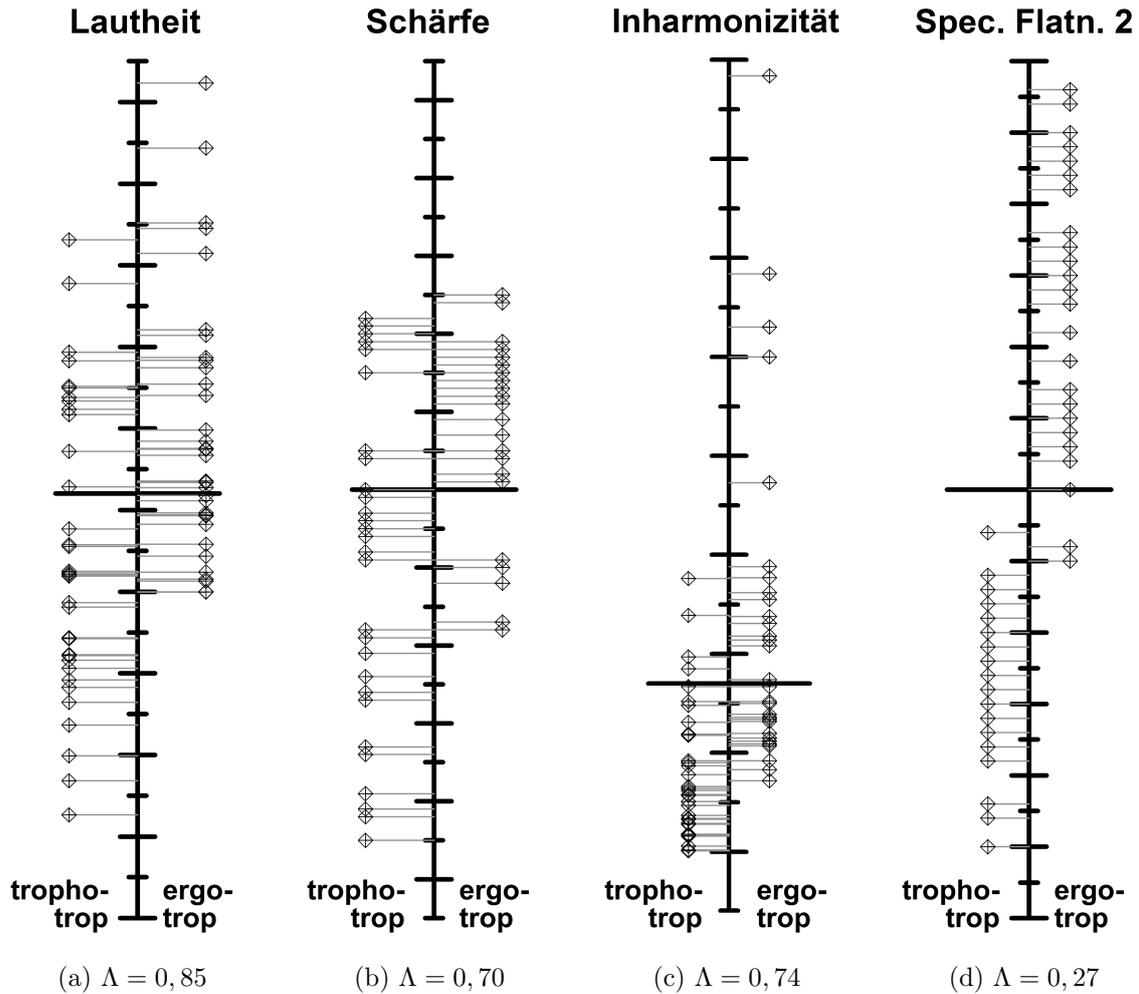


Abb. 5.11: Beispiele für die Verteilung von vier Merkmalen, Punkte auf der linken Seite stehen für trophotrope, auf der rechten für ergotrope Musikstücke; der schwarze Querstrich zeigt die Stelle des Mittelwertes \bar{x} aller Merkmale an

Loudness Spread

Der Spread⁴ misst die Entfernung vom Bark-Kanal mit der größten Lautheit zur gesamten Lautheit zu einem bestimmten Zeitpunkt [153]:

$$\text{Loudness Spread} = \left(1 - \frac{\max(z, N'(z))}{N} \right)^2 \quad (5.4)$$

Er ist damit ein Indikator, ob die Lautstärkeempfindung vor allem in einem Bark-Kanal konzentriert oder auf viele gestreut ist.

Der Loudness Spread schneidet statistisch mit einem Wilks'schen Lambda von fast eins und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von knapp 40 Prozent so schlecht ab, dass er von der weiteren Bewertung ausgeschlossen werden muss. Es ist zwar eine eindeutige Clusterbildung zu erkennen, allerdings ist kein Gesamttrend zur trophotropen Wirkung ablesbar. Vielmehr spiegelt dieses Merkmal die Instrumentierung der Werke wider. So finden sich im niedrigen Bereich überwiegend Werke für Klavier oder andere Soloinstrumente sowie Konzerte, bei denen ein Instrument zumindest herausgehoben erklingt – bei diesen ist die Schallenergie notwendigerweise in den Frequenzbändern des Soloinstruments konzentriert. Auch das andere Ende der Skala ist plausibel: Hier finden sich vor allem Stücke mit vollem Orchester und vielen Streichern, also sehr obertonreichen Instrumenten, die ihre Schallenergie über viele Frequenzbänder verteilen.

Schärfe

Die Schärfe eines Klanges – vom Höreindruck vergleichbar mit der Brillanz – ist ein wesentlicher Teil der Klangfarbe. Sie beschreibt den empfundenen Anteil von hohen Frequenzen im Signal und ist damit wie die Lautheit eine Empfindungsgröße.

Einem Schmalbandrauschen mit Mittenfrequenz 1 kHz und einem Pegel von 60 dB wurde zunächst die Schärfe von 1 acum⁵ zugeordnet. Eine doppelt so groß empfundene Schärfe entspricht dann definitionsgemäß 2 acum. In Hörversuchen wurde gezeigt, dass die Schärfe vor allem von der spektralen Zusammensetzung des Signals abhängt, oder genauer von der spektralen Umhüllenden, denn es ist für den Höreindruck irrelevant, ob das Spektrum kontinuierlich ist oder sich aus benachbarten Linien zusammensetzt.

⁴ spread (engl.): Ausdehnung, Differenz

⁵ acum (lat.): scharf

Die Berechnung ähnelt der des Spectral Centroid aus Abschnitt 5.2.1.6. Allerdings wird nicht der Schwerpunkt des Frequenzspektrums berechnet, sondern die Verteilung der Spezifischen Lautheit über die einzelnen Bark-Kanäle:

$$S = 0,11 \cdot \frac{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' \cdot z \cdot g(z) dz}{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' dz} \quad (5.5)$$

Der Term im Nenner entspricht dabei der Gesamtlautheit. Da sich der Anteil an Frequenzen über 3,5 kHz (16. Bark-Kanal) besonders stark auf die Schärfe auswirkt, musste im Zähler noch eine korrigierende Gewichtungsfunktion $g(z)$ eingefügt werden, die diese hohen Frequenzen zusätzlich betont, wie in Abbildung 5.12 ersichtlich.

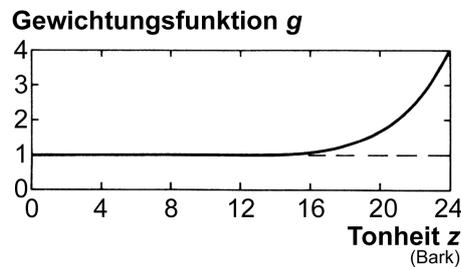


Abb. 5.12: Gewichtungsfunktion $g(z)$ für die Schärfe

Die Schärfe ist somit ein gewichtetes Moment der Tonheitsverteilung der Spezifischen Lautheit [211].

Die Schärfe und deren statistische Analysen über den Zeitverlauf liegen mit einem minimalen Wilks'schen Lambda von 0,65 etwas besser als die Lautheit. Zur Veranschaulichung sind die Musikstücke in Abbildung 5.11b ebenfalls nach der Schärfe sortiert. Wieder ist die klare Tendenz erkennbar, dass trophotrop wirkende Musik eher weniger scharf ist. Dominierender ist allerdings der Einfluss der Instrumentierung: Klavier mit wenigen Obertönen bedeutet geringe Schärfe; dominierende Streicher, besonders Violinen, eine hohe Schärfe. Somit ist es nicht verwunderlich, dass alle ergotropen Klavierkonzertsätze im niedrigen Bereich zu finden sind, während etwa Dvořaks trophotrope Violinromanze das Stück mit der fünftgrößten Schärfe ist.

Weitere psychoakustische Wahrnehmungsgrößen

Mel Frequency Cepstral Coefficients

Eine der im Bereich der Spracherkennung am häufigsten eingesetzten Methoden ist die Berechnung der Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCC). Diese ermöglichen es, immer wieder vorkommende und möglicherweise bekannte Schwingungsanteile herauszufiltern. Mehr und mehr werden die MFCC auch in der Genreklassifizierung angewendet, da das Spektrum so mit wenigen, unkorrelierten Koeffizienten dargestellt werden kann. Beth Logan konnte in [118] zeigen, dass die Berechnung der MFCC grundsätzlich auch für andere Signale wie etwa Musik möglich und aussagekräftig ist und sich damit unter anderem ein Klassifikator zwischen Sprach- und Musiksignalen definieren lässt. So wurde in [154] ein auf den MFCC basierendes Klassifikationssystem für verschiedene akustische Szenen wie Straßenverkehr oder Büro erstellt.

Aufgrund der häufigen Verwendung und Vielseitigkeit der Cepstral-Koeffizienten, erscheint es sinnvoll, den Nutzen dieser Merkmale auch für die Unterscheidbarkeit blutdrucksenkender Musik zu prüfen. Ein großer Vorteil der MFCC ist, dass ihre Berechnung die Verhaltensweise des menschlichen Hörsinns bezüglich der Tonhöhen-Wahrnehmung nachbildet. Wie in Abschnitt 5.2.1.1 besprochen, wird diese bis zu einer Frequenz von ungefähr 1 kHz linear und darüber logarithmisch wahrgenommen, was die Mel-Skala als Wahrnehmungsskala der Tonhöhe berücksichtigt.

Die Berechnung der MFCC ist in der Auditory-Toolbox von Malcolm Slaney umgesetzt. Sie gliedert sich in sechs Teilschritte [181, 202].

1. Preemphasis

Eventuell wird zunächst eine Hochpassfilterung erster Ordnung vorgenommen, um die hochfrequenten Signalanteile zu verstärken und das Spektrum zu glätten [92].

2. Fensterung

Die anschließende Transformation in den Frequenzbereich setzt voraus, dass das Ton-signal in einem kleinen Fenster annähernd stationär ist. Zu klein darf das Fenster allerdings auch nicht sein, da sonst die Frequenzauflösung zu schlecht wird (siehe Abschnitt 4.2.2.2). Üblicherweise werden 20 bis 25 ms lange, sich überlappende Fenster mit weichen Kanten gewählt, um so unerwünschte Artefakte zu vermeiden – etwa das Hamming-Fenster.

3. Fourier-Transformation

Über eine Diskrete Fourier Transformation (DFT) berechnen sich die spektralen Anteile jedes einzelnen Fensters. Ein zeitbegrenzttes Signal ergibt das Spektrum

$$s_t(n) \circ \bullet \mathcal{F}\{s_t(n)\} = S_t(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} s_t(n) \cdot e^{-j\omega n} \quad (5.6)$$

mit dem gefensterten Signal $s_t(n)$, der Länge N und ω als kontinuierlicher Frequenzvariable.

4. Berechnung des Cepstrum

Da die in Abschnitt 5.2.1.1 besprochene Tonheit-Empfindung annähernd logarithmisch verläuft, wird das gesamte Amplituden-Spektrum logarithmiert und man erhält das sogenannte Cepstrum⁶. Die Information über die Phase geht in diesem Schritt verloren. Wenn sich das Sprachsignal

$$x(t) = v(t) * h(t) \circ \bullet \mathcal{F}\{v(t) * h(t)\} \quad (5.7)$$

aus der Anregung durch die Stimmbänder $v(t)$ und einer Filterung durch den Vokaltrakt $h(t)$ zusammen setzt, berechnet sich das Cepstrum

$$\begin{aligned} \hat{x}(k) &= \mathcal{F}^{-1} \left\{ \log \left(\mathcal{F} \{v(t) * h(t)\} \right) \right\} \\ &= \mathcal{F}^{-1} \left\{ \log \left(V(e^{j\omega}) \right) + \log \left(H(e^{j\omega}) \right) \right\} \\ &= \hat{v}(k) + \hat{h}(k) \end{aligned} \quad (5.8)$$

als Summe, wobei $\hat{v}(k)$ und $\hat{h}(k)$ die Cepstren zu $v(t)$ und $h(t)$ sind [202].

5. Mel-Skalierung

Anschließend wird das Spektrum gemäß der Mel-Skala in seine Bestandteile zerlegt. Das bedeutet, dass die beim Hören besonders wichtigen Frequenzen im linearen Bereich der Mel-Skala unter 1 kHz mit 13 relativ schmalbandigen, sich überlappenden Dreiecksfiltern extrahiert werden, während ab 1 kHz in logarithmischen Abständen 27 immer breiter werdende Filter eingesetzt werden. In der Mel-Skala sind damit alle Filter äquidistant angeordnet. Die Filterbänke sind in Abbildung 5.13 über die Frequenzachse dargestellt.

⁶ Das Wort „Cepstrum“ entsteht durch Vertauschen der ersten Buchstaben des englischen Wortes „Spectrum“.

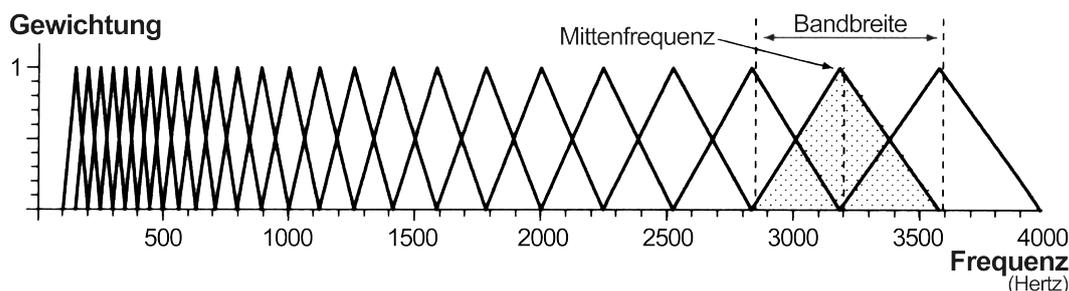


Abb. 5.13: Filterbänke für die Mel-Skalierung

6. Verringerung der Dimension

Aus den vierzig Mel-Dreiecksfiltern ergeben sich nun vierzig Energie-Koeffizienten, die aber hochgradig korreliert sind. Deshalb wird ihre Zahl auf üblicherweise 13 Koeffizienten verringert. Das kann mit einer Hauptachsentransformation geschehen oder – im Fall der Auditory Toolbox – mit einer Diskreten Cosinus Transformation, die ähnliche Eigenschaften aufweist, jedoch wesentlich schneller zu berechnen ist. Der erste Koeffizient $MFCC_1$ kann als Signalenergie interpretiert werden, während $MFCC_2$ bis $MFCC_{13}$ das Spektrum beschreiben.

Diese 13 Koeffizienten werden nun statistisch ausgewertet, indem für jeden Koeffizienten der größte und kleinste Extremwert, der zeitliche Durchschnitt sowie die Standardabweichung der Verteilung über der Zeit bestimmt werden. Insgesamt stehen also $4 \cdot 13 = 52$ Kennzahlen zur Verfügung.

Die überwiegende Anzahl der Kennzahlen schneidet im statistischen Test schlecht ab. Als Beste erweisen sich jeweils die Werte des ersten Koeffizienten, also der Signalenergie. Der zeitliche Maximalwert ergibt zum Beispiel $\Lambda = 0,56$, der Durchschnittswert $\Lambda = 0,67$.

Zusammenfassung Psychoakustische Merkmale

Die psychoakustischen Merkmale helfen nicht unmittelbar zur Unterscheidung ergotroper von trophotroper Musik. In den nächsten Abschnitten bilden sie jedoch immer wieder die Basis für die Berechnung anderer Merkmale, die dann oft sehr gute Ergebnisse produzieren, etwa die zeitliche Variabilität der MFCC in Abschnitt 5.2.1.2.

5.2.1.2 Dynamische Merkmale

Die meisten dynamischen Merkmale⁷ befassen sich mit dem Verlauf der Lautstärke über der Zeit: den absoluten Werten, vor allem aber deren Übergängen, ob sanftes An- und Absteigen oder abruptes Laut und Leise. Diese Eigenschaften tragen sehr stark zur inneren Ruhe und Ausgeglichenheit oder auf der anderen Seite zur Aufgewühltheit und Kraft eines Musikstückes bei und sind nach Decker-Voigts Beschreibung ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen ergotroper und trophotroper Musik.

Dynamik der zeitlichen Hüllkurve

Eine wesentliche Komponente der Dynamik ist das An- und Abschwollen der Lautstärke über der Zeit. Einen Amplitudenverlauf, wie der in Abbildung 5.16 auf Seite 142 dargestellte Teil eines Walzers, zeigt sowohl die einzelnen Schläge, als auch die Phrasierungen über mehrere Takte. Es ist erkennbar, ob staccato oder legato gespielt wird, ob es harsche Umbrüche zwischen laut und leise oder nur allmähliche Verläufe gibt – zwei Indizien, an denen laut Decker-Voigt ergotrope und trophotrope Musik unterschieden werden kann (siehe Abschnitt 4.2 und 4.2).

Also erscheint es vielversprechend, ein Merkmal zu kreieren, das die Dynamik der Einhüllenden der Amplitude untersucht.

Dazu wird die Amplitude zunächst mit einem Tiefpass gefiltert. Anschließend wird die zeitliche Änderung aufsummiert und mit der Dauer des analysierten Abschnittes normiert.

$$\text{Variabilität der Hüllkurven} = \frac{1}{T} \cdot \sum_t \left| \frac{dx_{TP}(t)}{dt} \right| \quad (5.9)$$

Diese Berechnungen werden für jeden der 2-Sekunden-Abschnitte gemacht. Anschließend werden Mittelwert und Standardabweichung über alle Abschnitte als Merkmal aufgenommen. Die Ergebnisse mit einem Wilks'schen Lambda von 0,76 respektive 0,83 sind nicht wirklich gut, aber in der Übersicht der Musikstücke gut nachvollziehbar: Beethovens Mondscheinsonate ohne große zeitliche Dynamik liegt ganz oben, während die drei Stücke aus der Filmmusik zu *Pirates of the Caribbean* durch eine besonders große Variabilität der Hüllkurve auffallen.

⁷ Dynamik (abgeleitet vom Griechischen): Kraft, mächtig

Dynamik der Lautheit

Da uns die Psychoakustik lehrt, dass wir nicht den in der Amplitude abgebildeten Schalldruck wahrnehmen, sondern die Empfindungsgröße Lautheit, liegt es nahe, die Dynamikuntersuchungen auch für die Lautheit zu machen. Zunächst wird analog zur Variabilität der Hüllkurve aus dem vorherigen Abschnitt die

$$\text{Variabilität der Lautheit } 1 = \frac{1}{\Delta T} \cdot \sum_t \left| \frac{\partial N(t)}{\partial t} \right| \quad (5.10)$$

normiert mit der Zeit und die

$$\text{Variabilität der Lautheit } 2 = \frac{1}{N(t)} \cdot \sum_t \left| \frac{\partial N(t)}{\partial t} \right| \quad (5.11)$$

bezogen auf die totale Lautheit berechnet. Mit einem Lambda von 0,50 beziehungsweise 0,56 ist die Trennung hier wesentlich schärfer als bei der Amplitude, wobei es einige Ausreißer gibt. Grundsätzlich haben alle ergotropen Stücke eine größere Dynamik in der Lautheit mit Ausnahme der Stücke aus *Pirates of the Caribbean* – diese sind einfach konstant laut, so dass sie bei der ersten, zeitnormierten Berechnungsmethode mitten im trophotropen Block landen. Hier eignet sich die zweite Methode, die Lautheitsänderung auf die absolute Lautheit zu beziehen, besser. Allerdings gibt es auch hier einige ergotrope Ausreißer, wie etwa der *Höllentanz des Königs Kastschej* aus Strawinskys *Feuervogel*.

Die Ursache ist zu erkennen, wenn dieses Merkmal weiter aufdifferenziert wird, denn eine höbare Dynamik bildet sich nicht unbedingt im zeitlichen Verlauf der totalen Lautheit ab, sondern auch in der Lautheitsverteilung zwischen den Frequenzen. Mehrere abwechselnd erklingende, aber für sich gleich laut wirkende Töne, können eine Dynamik erzeugen, die in der absoluten Lautheit gar nicht sichtbar ist. Genau dieser Effekt tritt beim Feuervogel-Tanz auf: Die wilden auf- und absteigenden Tonfolgen sind durch die einzelnen Bark-Kanäle gut verfolgbar, ohne dass sich die Lautheit aller Kanäle in Summe wesentlich ändern würde.

Deshalb wird die Relative Spezifische Lautheit

$$N_{rel}(z, t) = \frac{N'(z, t)}{N} \quad (5.12)$$

berechnet, also die mit der totalen Lautheit N normierte Spezifische Lautheit in den einzelnen Barkkanälen [153]. Aus der Standardabweichung dieser Lautheitsverteilung

wird nun auf die Dynamik im Musikstück geschlossen. Zum einen in der Zeitdimension für jeden einzelnen Barkkanal und zum anderen in der Bark-Dimension zu jedem einzelnen Zeitpunkt. Während die mittlere zeitliche Dynamik der Bark-Kanäle keine neuen Erkenntnisse liefert, erreicht die mittlere Dynamik zwischen den Frequenzgruppen einen guten Lambda-Wert von 0,45.

Spectral Flux

Der Spectral Flux ist ein weiteres Maß für die Dynamik. Im Gegensatz zur Untersuchung der Lautheit oder Amplitude im Zeitbereich wird jetzt die zeitliche Änderung des Spektrums untersucht. Die Formel

$$\text{Spectral Flux} = 1 - \frac{\sum_f (X(f, t-1) \cdot X(f, t))}{\sqrt{\sum_f X(f, t-1)^2} \cdot \sqrt{\sum_f X(f, t)^2}} \quad (5.13)$$

basiert auf der Kreuzkorrelationsfunktion zwischen dem Spektrum zweier aufeinander folgender Frames $X(f, t-1)$ und $X(f, t)$ [153]. Für identische Spektren ergibt sich ein Wert von null, für sehr unterschiedliche Spektren ein Wert von bis zu eins.

Das Wilks'sche Lambda dieses Merkmals liegt bei 0,43; ergotrope und trophotrope Musikstücke sind sichtbar, aber mit einem diffusen Übergangsbereich getrennt. Weniger erfolgreich ist die Auswertung der Standardabweichung der Verteilung des Spectral Flux über der Zeit mit $\Lambda = 0,84$.

Delta Spectrum Magnitude

Ein weiteres Merkmal, das die Variabilität des Spektrums untersucht, ist die Delta Spectrum Magnitude. Hier wird die Differenz der Magnitude zweier benachbarter Zeitschritte für jede einzelne Frequenz aufsummiert:

$$DSM = \frac{1}{T} \cdot \sum_t \sum_f \|X(f, t-1) - X(f, t)\| \quad (5.14)$$

Ursprünglich wurde dieses Merkmal benutzt, um Sprache von Musik zu unterscheiden, da die Änderungen zwischen den Frames bei Sprachsignalen viel größer sind [116]. Doch auch für unsere Anwendung ist dieses Merkmal verwendbar. Mit einem Lambda von 0,67 ist eine Trennung nur mäßig möglich.

Etwas besser ist die Betrachtung der ersten zeitlichen Ableitung der DSM

$$DSM' = \sum_t \left| \frac{dDSM}{dt} \right|, \quad (5.15)$$

also die Änderung der Änderung des Spektrums. Hier erhält man ein Lambda von 0,65.

Delta-MFCC und Delta-Delta-MFCC

Neben den in Abschnitt 5.2.1.1 beschriebenen Merkmalen, die sich direkt aus den Cepstral Koeffizienten ableiten, wird auch die Dynamik des Cepstrums untersucht und die sogenannten Delta-Werte

$$\Delta MFCC = \frac{dMFCC}{dt} \quad (5.16)$$

sowie die zweite Ableitung der Koeffizienten über der Zeit

$$\Delta\Delta MFCC = \frac{d^2 MFCC}{dt^2} \quad (5.17)$$

berechnet.

Die $\Delta MFCC$ schneiden allesamt recht passabel ab. Da die Koeffizienten $\Delta MFCC_2$ bis $\Delta MFCC_{13}$ sehr stark korreliert sind, geht nur einer von diesen mit $\Lambda = 0,51$ sowie der $\Delta MFCC_1$, der die Änderung der Signalenergie ausdrückt, mit $\Lambda = 0,47$ in die weitere Analyse ein.

Auch die $\Delta\Delta MFCC$ schneiden mit einem Wilks'schen Lambda von bis zu 0,53 akzeptabel ab, sind jedoch zwischen den Koeffizienten $\Delta MFCC_2$ und $\Delta MFCC_{13}$ ebenfalls stark korreliert und werden deshalb nicht berücksichtigt.

Modulationen der MFCC

Ebenfalls untersucht wurde, ob die Koeffizienten Periodizitäten aufweisen. Dazu wurden zehn Resonatoren mit der Resonanzfrequenz von 1 bis 10 Hz mit den 13 Koeffizientenvektoren beaufschlagt.

Tatsächlich lassen sich im Mittel Unterschiede zwischen trophotroper und ergotroper Musik finden. So sind die Modulationen bei ergotropen Stücken vor allem im ersten Cepstral-Koeffizienten, der mit der Signalenergie korreliert ist, viel größer und

in höheren Frequenzbereichen bis fast 10 Hz ein wenig größer als bei trophotroper Musik. Hingegen überwiegt die Modulation bei trophotroper Musik im Bereich 0 bis 1 Hz in allen MFCC.

Bei der Betrachtung der Musikstücke im Einzelnen ist festzustellen, dass neben den Musikstücken, die das beschriebene Durchschnittsverhalten sehr gut wiedergeben, sowohl in der ergotropen als auch in der trophotropen Klasse rund ein Drittel der Musikstücke genau gegenteiliges Verhalten aufweisen.

Somit scheint ausgeschlossen, dass das Modulationsverhalten der Cepstral-Koeffizienten ein relevantes Unterscheidungskriterium zwischen den beiden Klassen darstellt. Da die Berechnung sehr rechenzeitaufwendig ist, wurden diese Merkmale nicht weiter verwendet.

Anteil der Low-Energy-Frames

Dieser Kennwert misst den prozentualen Anteil der Frames mit einer Energie von weniger als der Hälfte der Durchschnittsenergie des gesamten Musikstückes

$$\sqrt{\frac{s(t)^2}{T_s}} < 0,5 \cdot \overline{RMS}, \quad (5.18)$$

wobei T_s die Abtastdauer ist. Die Signalenergie RMS ist gemäß Formel 5.33 berechnet. Ursprünglich kommt dieses Merkmal aus der Musik-Sprach-Unterscheidung sowie der Sprecher-Unterscheidung, da so die für Sprachsignale charakteristischen Sprechpausen detektiert werden können [99]. Auch für Musiksignale ergeben sich relevante Informationen und die Musikauswahl kann mit einem Wilks'schen Lambda von 0,86 für den Mittelwert und 0,80 für das Minimum der analysierten 2-Sekunden-Abschnitte unterschieden werden.

Beide Blöcke sind klar erkennbar, allerdings gibt es einige ergotrope „Ausreißer“ im trophotropen Bereich, die mit der Binnendynamik des jeweiligen Stückes leicht erklärbar sind. So hat trophotrope Musik im Querschnitt einen geringeren Low-Energie Anteil, da sie eher eine geringere Dynamik aufweist, also gleichmäßig laut – oder vielmehr: leise – erklingt. Daneben gibt es ergotrope Musik, die tatsächlich fast immer gleich *laut* ist, etwa Dvořáks Karneval-Ouvertüre.

Fluctuation Pattern

Das Fluctuation Pattern beschreibt die Schwankung der Lautheit in den einzelnen Frequenzbändern. Die Schwankungsstärke⁸ als Empfindungsgröße kommt aus der Psychoakustik und ist ein wichtiges Element unserer Tonwahrnehmung. Als Schwankungen nehmen wir Variationen im Bereich bis etwa 15 Hz wahr. Darüber hinaus geht der Eindruck der Schwankungsstärke nahtlos in die Rauigkeit⁹ über. Bekannte musikalische Effekte, die eine Schwankungsstärke erzeugen, sind das Tremolo- oder Vibrato-Spiel bei Streichinstrumenten.

Zunächst wird die Spezifische Lautheit N' (siehe Abschnitt 5.2.1.1) für die ersten zwanzig Bark-Kanäle berechnet. Anschließend wird N' in jedem Band Fourier-transformiert, so dass nun also die im Verlauf der Lautheit enthaltenen Frequenzen detektiert werden. Da die Schwankungsstärke abhängig von ihrer Modulationsfrequenz unterschiedlich intensiv empfunden wird und vor allem bis zehn Hertz sehr präsent wahrnehmbar ist, wird das Ausgangssignal der Fouriertransformation mit einer in Hörversuchen gewonnenen Gewichtungsfunktion multipliziert, anschließend durch ein Gauß-Filter geglättet und in einer Matrix ausgegeben. Abbildung 5.14 zeigt das Fluctuation Pattern mit zwanzig Zeilen für die Bark-Kanäle und sechzig Spalten für die Frequenzstufen bis 10 Hz.

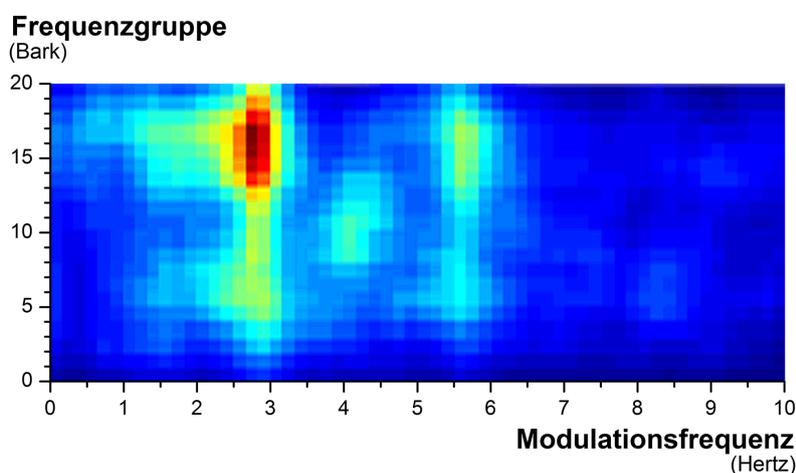


Abb. 5.14: Fluctuation Pattern

⁸ Einheit: 1 vacil

⁹ Einheit: 1 asper

Neben den gewöhnlichen statistischen Auswertungen wie der Detektion von Maximum und Minimum pro Bark-Kanal oder Modulationsfrequenz, werden in [151] zwei weitere numerische Parameter hergeleitet:

- Der *Focus* beschreibt, ob die Energie im Fluctuation Pattern hauptsächlich in kleinen Bereichen fokussiert oder weitgehend gleichmäßig über die gesamte Fläche verteilt ist.
- Das *Centre of Gravity* gibt den Schwerpunkt auf der Modulationsfrequenzachse an. Üblicherweise liegt dieser zwischen 3 und 5 Hz.

Das Fluctuation Pattern ist in der MA-Toolbox von Elias Pampalk [150] für MATLAB implementiert. Da mit der für die bisherigen Merkmale verwendeten Musiksequenz von zwei Sekunden niedrige Modulationsfrequenzen nur sehr ungenau berechnet werden können, sind längere Abschnitte nötig; in [62] wurde eine Periodendauer von sechs Sekunden gewählt. Anschließend werden die Matrizen dieser Sequenzen zusammen gerechnet und global für das ganze Musikstück ausgewertet.

Die 27 abgeleiteten Kennzahlen haben ein durchschnittliches Wilks'sches Lambda von 0,73. Die besten Merkmale sind

- die Standardabweichung der Modulationsfrequenz mit dem jeweils größten Eintrag im Fluctuation Pattern (FP_fluctsumMax) mit $\Lambda = 0,59$,
- das Maximum der Summen über alle Einträge im Fluctuation Pattern entlang jeweils eines der sechzig Modulationskanäle (FP_fluctsumFreque) mit $\Lambda = 0,59$ und
- der Mittelwert der zwanzig Einträge entlang eines der Barkkanäle (FP_barksum-Channel) mit $\Lambda = 0,58$.

Auditory Filterbank Temporal Envelopes

Dieser Satz an Merkmalen basiert wieder auf einem gehörgerechten Modell. Zuerst wird das Audiosignal mit 18 Gammaton-Filtern gefiltert, die die Signalverarbeitung der Basilarmembran im Innenohr nachahmen. Anschließend wird von allen 18 Kanälen das Modulationsspektrum über alle Frequenzen erstellt. In [128] werden dann als Merkmale neben der Energie des unmodulierten Signals die aufsummierte Energie in drei

Modulationsbereichen zwischen 3 und 1000 Hz für alle 18 Kanäle berechnet, woraus ein 62-dimensionaler Vektor entsteht.

Leider war für dieses Modell keine geeignete Implementierung zu finden, so dass die Auswertung diese Merkmale in der vorliegenden Arbeit nicht behandelt ist.

Perkussivität

Psychoakustische Studien haben gezeigt, dass Instrumente nicht nur durch ihr Obertonspektrum charakterisiert werden, sondern auch durch ihre zeitliche Hüllkurve, die Anschlag-Abkling-Charakteristik. In Abbildung 5.15 ist der Amplitudenverlauf eines einzelnen, auf dem Klavier gespielten Tones zu sehen. Als Anschlag (engl.: attack) wird das Intervall, in dem die Einhüllende der Amplitude anwächst, bezeichnet. Anschließend klingt der Ton wieder ab (decay), kann aber auch weiterklingen, wenn die Klaviertaste nicht losgelassen wird (sustain), bevor er schließlich verschwindet (release).

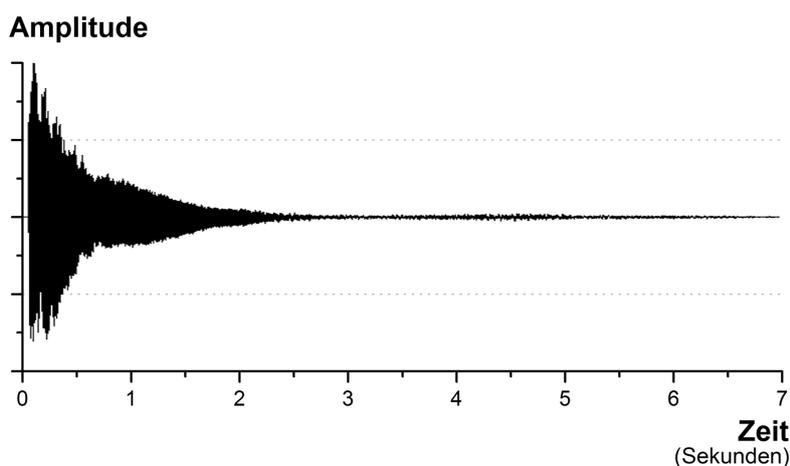


Abb. 5.15: Amplitudenverlauf eines Klaviertons

Genau diesen Hüllkurvenverlauf suchen und untersuchen die perkussiven Merkmale im gesamten Musikstück: Die Zeitpunkte und -dauern der einzelnen Phasen, die Amplitudenunterschiede sowie die Formen der Hüllkurven [180].

Über perkussive Merkmale sind zwar einige Publikationen (wie zum Beispiel [153] oder [180]), vor allem aus dem Umfeld der Philips Research Laboratories zu finden, allerdings finden diese Algorithmen kommerzielle Anwendung und sind somit nicht

frei verfügbar. Daher werden die perkussiven Merkmale nicht genutzt. Für die Genre-Klassifizierung erzielen sie gute Ergebnisse [179].

Zusammenfassung Dynamische Merkmale

Die dynamischen Merkmale sind zwar im Bezug auf die scharfe Trennbarkeit von ergotrop und trophotrop wirkender Musik nicht ganz vorne mit dabei, doch gibt es eine Vielzahl an Merkmalen die brauchbare Ergebnisse liefern, hochsignifikant sind und deshalb zur Klassifizierung herangezogen werden. Unter den fünfzig Merkmalen mit dem geringsten Wilks'schen Lambda Λ befinden sich allein 27 dynamische Merkmale, was zeigt, wie wichtig diese Eigenschaften für eine blutdrucksenkende Wirkung sind. Allerdings bilden die dynamischen Merkmale auch insgesamt die umfangreichste Kategorie.

5.2.1.3 Rhythmus-basierte Merkmale

Als Rhythmus wird die durch die Folge unterschiedlicher Notenwerte entstehenden Akzentmuster über dem Grundschatz bezeichnet. Auch wenn streng genommen jede Akzentuierung einen Rhythmus darstellt, wird hier vor allem eine immer wiederkehrende, rhythmische Periodizität – die in der Regel mit dem musikalischen Takt zusammenfällt – gemeint, was für die verwendete abendländische Musik (siehe Abschnitt 4.2.1) bis zum frühen 20. Jahrhundert auch zutrifft.

Ob der Rhythmus eher als spannungsgeladen und aufregend oder als beruhigend empfunden wird, hängt sehr stark davon ab, wie kompliziert oder einfach er gestaltet ist, aber auch, ob viele rhythmische Akzente gegen den oder mit dem Grundschatz gesetzt sind.

Diese und andere Eigenschaften untersuchen die im Folgenden vorgestellten Merkmale. Dabei gehen sie auf Periodizitäten zwischen 0,33 und 5 Hz ein – langsamere Periodizitäten werden vom Hörer in der Regel nicht aufeinander bezogen, also in einen rhythmischen Zusammenhang gesetzt. Schnellere fallen dagegen in den Bereich der psychoakustischen Größe der Schwankungsstärke, die ihrerseits ab ungefähr 20 Hz in die Rauigkeit übergeht. Je schneller diese Periodizitäten also sind, desto mehr werden sie eine Eigenschaft der Klangfarbe.

Wichtiger Bestandteil des Rhythmus ist der Grundschat, also die dominierende Periodizität im Musikstück. In der Regel fällt dieser mit den Viertel-, Halben- oder Achtelnoten zusammen. Es gibt eine Reihe von Publikationen, die versuchen, ein physiologisch bevorzugtes Tempo des Grundschatges festzustellen, etwa von Moelants [139]. Der Mensch wird dort als eine Art Resonanzsystem betrachtet: Die Physiologie (Atemfrequenz, Herzfrequenz . . .) aber auch natürliche Bewegungen wie Gehen, Klatschen oder im-Rhythmus-Mitwippen werden als periodische Ereignisse interpretiert und die bevorzugte Frequenz, in der diese stattfinden, als Resonanzfrequenz bezeichnet.

Auch wenn die Studien kein eindeutiges Bild ergeben [139], sehen die meisten ein bevorzugtes Tempo bei 120 bis 130 bpm¹⁰ – damit liegt die Vermutung nahe, dass trophotrope Musik einen Grundschat in diesem Tempo haben muss, um „angenehm“ in der körpereigenen Resonanz wirken zu können.

Grundsätzlich gibt es hier zwei Arten von Merkmals-Extraktions-Algorithmen. Die einen suchen Periodizitäten im Signal und schließen daraus auf den Rhythmus, die anderen versuchen über den zeitlichen Verlauf des Stückes Betonungen zu detektieren, die den Rhythmus ausmachen. Da einige Verfahren den Rhythmus über mehrere Taktperioden betrachten müssen, wird der normalerweise zwei Sekunden lange, zu analysierende Musikabschnitt je nach Anforderung auf bis zu zwölf Sekunden vergrößert.

Rhythmus-Modell von Zwicker und Fastl

Ein Algorithmus, der letzteren Ansatz aufgreift, ist das Rhythmus-Modell von Zwicker und Fastl, das in [62] implementiert wurde. Es versucht, alle Betonungen innerhalb eines gewählten Musikabschnittes (hier zwei Sekunden) aufzuspüren. Dazu wird der Verlauf der Lautheit in diesem Abschnitt untersucht: Zunächst wird das lauteste Event N_{max} als Betonung betrachtet. Alle weiteren Stellen müssen drei Kriterien erfüllen:

- Das Event muss eine absolute Lautheit $N > 0,43 \cdot N_{max}$ aufweisen.
- Der Zuwachs der Lautheit vor dem Event muss mindestens $0,12 \cdot N_{max}$ betragen.
- Der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden, rhythmischen Events muss größer als 120 ms sein.

¹⁰ bpm, Beats per Minute (engl.): (Grund-) Schläge pro Minute, das am Metronom gängige Maß für Tempi von Musikstücken.

Wie schon die Dynamik, kann auch der Rhythmus nicht nur durch Wechsel der Lautheit, sondern auch durch Wechsel der Tonhöhe, also eine Frequenzmodulation, zustande kommen – dieser Einfluss wird mit dem Modell von Zwicker und Fastl nicht beachtet.

Als Kennzahlen werden

- die Anzahl detektierter Betonungen (onsetCount),
- die Zeiten zwischen aufeinanderfolgenden Betonungen (onsetIntervals),
- der Lautheitszuwachs ΔN durch Betonungen (deltaN) und
- die Lautheit N der Betonungen (Nvals)

betrachtet [62]. Leider weisen sie großteils nur eine sehr geringe Trennkraft auf. Die besten Ergebnisse erzielt die mittlere Anzahl detektierter Betonungen mit $\Lambda = 0,64$.

Inter Onset Intervall Histogram

Auch das Inter Onset¹¹ Intervall Histogram (IOIH) versucht, einzelne Noten oder, wo das nicht möglich ist, wenigstens die Betonungen zu erkennen. Wie in Abschnitt 5.2.1.2 gezeigt, hängt die Güte dieses Verfahrens stark vom erklingenden Instrument ab.

Im Gegensatz zum obigen Rhythmus-Modell nutzt das IOIH nicht die Lautheit, sondern das Spektrum als Eingangssignal und kann so auch Schwankungen in der Tonhöhe in die Berechnungen einbeziehen. Immer wenn die Änderung der Energie über alle einzelnen Frequenzen im Spektrum summiert einen bestimmten Schwellenwert c übersteigt,

$$\frac{\partial P(t, f)}{\partial t} > c \Big|_{f=const.} \quad (5.19)$$

wird eine Betonung, ein Onset, festgestellt. Als nächstes werden die Abstände zwischen den Onsets berechnet, gezählt und in einem Histogramm aufgetragen. Auf diese Weise kann recht gut auf Tempo und, unter Einbeziehung der Verhältnisse der Ausschläge im Histogramm, sogar auf das Genre des analysierten Musikstückes rückgeschlossen werden. Letzteres ist allerdings mit einer großen Unsicherheit verbunden, da das IOIH

¹¹ onset (engl.): Beginn

nicht feststellen kann, wie die Betonungen im Takt liegen. Die Tänze *Rumba* und *Cha Cha Cha* haben zum Beispiel dieselbe zeitliche Struktur, nur die Taktzäsur befindet sich an einer anderen Stelle.

Leider gibt es keine fertige MATLAB-Implementierung, weswegen auch hier auf das von Flurschütz [62] verwendete Periodicity Histogram aus der MA-Toolbox von Pam-palk [150] zurückgegriffen wird, das eine ganz ähnliche Funktionsweise hat.

Periodicity Histogram

Das Periodicity Histogramm verbindet die Ansätze von Zwicker und Fastl sowie des IOIH, indem es das Signal – analog zu den Frequenzgruppen – in mehrere Subbänder zerlegt und dort die Hüllkurve der Spezifischen Lautheit N' (siehe Abschnitt 5.2.1.1) analysiert [150]. Nach einer Einweggleichrichtung werden vierzig Resonatoren (rückgekoppelte Kammfilter) der Resonanzfrequenzen zwischen 2/3 und 4 Hz mit dem Signal jedes Subbandes beaufschlagt. Über die ausgegebene Energie der einzelnen Resonatoren kann dann jedes Subband auf das Vorkommen der jeweiligen Periodizität überprüft werden [62]. Diese werden aufaddiert und in Histogrammform dargestellt.

Wie beim Fluctuation Pattern (Abschnitt 5.2.1.2) werden hier die beiden Parameter *Focus* und *Center of Gravity* ausgewertet; daneben die Summe aller Einträge im Histogramm (PH_sum), der maximale Eintrag (PH_maxValue) sowie dessen Tempo (PH_maxTempo).

Das Wilks'sche Lambda liegt durchschnittlich beim annehmbaren Wert von 0,62. Einige Merkmale, wie das mittlere *Center of Gravity* oder der mittlere *Focus*, liegen mit $\Lambda = 0,37$ und $\Lambda = 0,40$ in der Spitzengruppe der besten Merkmale.

Beat Tracking

Beat Tracking Algorithmen, wie zum Beispiel der im Rahmen des LabROSA-Projektes¹² von Dan Ellis programmierte [54], erstellen ein Tempo-Profil über das ganze Musikstück hinweg. Sie sind also in der Lage, Tempoänderungen – wie sie ja nicht selten vom Komponisten vorgesehen sind – zu erkennen, was viele der oben vorgestellten

¹² LabROSA: Laboratory for the Recognition and Organization of Speech and Audio

Verfahren irritiert, da die verschiedenen Tempi etwa in den Autokorrelationsfunktionen verwischen und somit ein indifferentes und nur schwer zu interpretierendes Bild hinterlassen.

Beim Modell von Dan Ellis wird zunächst das globale Tempo durch die in Abschnitt 5.2.1.3 beschriebene Onset-Detektion geschätzt. Um rhythmische Events nicht nur durch Änderung der Lautstärke sondern auch durch Variation der Tonhöhe zu erkennen, wird das Signal in Bark-Kanäle zerlegt und wie bei den MFCC logarithmiert, um so die menschliche Wahrnehmung nachzubilden.

Anschließend untersucht der „Beat Tracker“ den gesamten zeitlichen Verlauf und nimmt dabei, basierend auf dem Temposchätzwert, jeweils einen Abschnitt von wenigen Taktperioden unter die Lupe [55].

Der Beat Tracking Algorithmus von Dan Ellis wurde in [62] implementiert und wertet die Zeitintervalle zwischen den erkannten Events sowie die Zunahme der Hüllkurve bei einem Event aus. Die meisten Merkmale trennen relativ schlecht und müssen schon wegen mangelnder Signifikanz gestrichen werden. Eine Ausnahme bildet jedoch die mittlere Energiezufuhr in den Frequenzbändern (onsetenv_mean) mit $\Lambda = 0,37$. 3

Beat Histogram

Auch das Beat Histogram versucht, die verschiedenen Periodizitäten eines Musikstückes zu erkennen und daraus Rückschlüsse über das Tempo und den rhythmischen Aufbau zu gewinnen. Der Algorithmus von George Tzanetakis, basiert im Gegensatz zu den oben vorgestellten Ansätzen, welche Notenanfänge zu detektieren versuchen¹³, auf der Autokorrelation, der Selbstähnlichkeit des Signals [188].

Zunächst wird das zu analysierende Musikstück mit Hilfe der Diskreten Wavelet Transformation in jeweils eine Oktave breite Frequenzbänder transformiert, um den Einfluss einer bestimmten Tonlage zu vermeiden. Durch weitere Signalverarbeitungsschritte (Gleichrichtung, Tiefpass-Filterung, Downsampling und Entfernung des Mittelwerts zur Normalisierung) wird die Einhüllende im Zeitbereich extrahiert [190]. Abbildung 5.16 zeigt die Einhüllende eines Walzers im 3/4-Takt. Gut erkennbar sind die Dreiergruppen eines Taktes.

¹³ onset detection

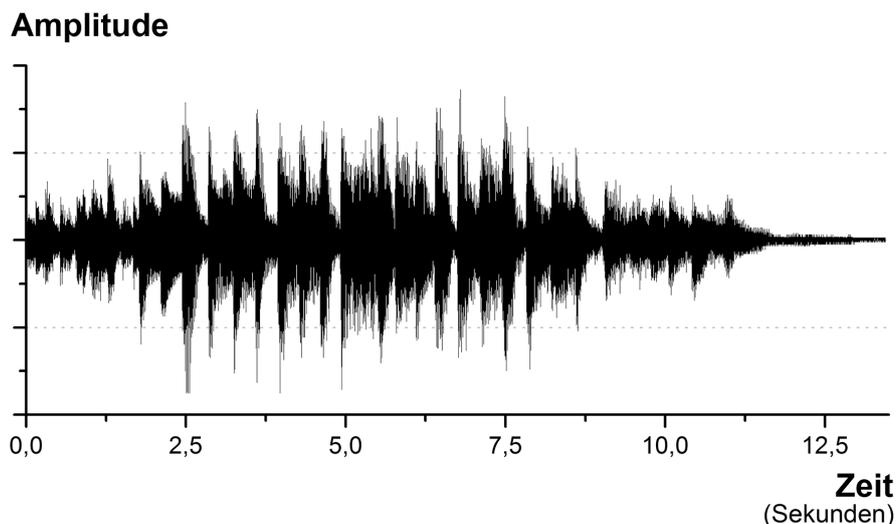


Abb. 5.16: Amplitudenverlauf eines Walzers

Nun wird die Autokorrelationsfunktion

$$X_{\text{korrr}}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S(f+k) \cdot S(f) \quad (5.20)$$

des Summensignals aus den Frequenzbändern berechnet, also das gesamte Signal $S(f)$ mit einem gegen sich selbst verschobenen Signal $S(f+k)$ auf Ähnlichkeit untersucht.

Da jede *un*verschobene Folge sich selbst am ähnlichsten ist, hat die Autokorrelation für $k=0$ den höchsten Wert. Handelt es sich um ein rein zufälliges Signal, wie etwa weißes Rauschen, ist die Autokorrelationsfunktion für $k \neq 0$ identisch mit Null. Enthält das Signal periodische Strukturen – also einen Rhythmus –, weist die Autokorrelation jeweils einen Scheitelpunkt auf, wenn die Verschiebung k der Periodizität $\frac{1}{k}$ entspricht: beim oben genannten Walzer-Beispiel also zum Beispiel einen stärkeren Ausschlag bei einer Verschiebung um drei Viertelnoten (einem ganzen Takt) und zwei kleinere bei einer Verschiebung um eine oder zwei Viertelnoten.

Die Abstände zwischen diesen Ausschlägen der Autokorrelationsfunktion werden aufsummiert und in Histogrammform dargestellt (siehe Beispiele in Abbildungen 5.17).

In den Histogrammen können mühelos einige Genres auseinandergehalten werden, etwa Rockmusik mit ihrer klaren und dominanten rhythmischen Struktur und klassische Musik. Darüber hinaus versucht das Beat Histogramm, den Grundschatz des Musikstücks zu erkennen. Zwar ermöglichen die auf der Onset-Detektion basierenden Verfahren oftmals eine bessere Bestimmung des genauen Tempos [188] [11]; dafür

hat das Beat Histogramm den Vorteil, dass *alle* Periodizitäten des analysierten Musikstückes aufgezeigt werden und sich auf Unterschiede zwischen trophotroper und nicht-trophotroper Musik prüfen lassen.

In Abbildung 5.17 sind jeweils zwei normierte Histogramme von trophotropen und nicht-trophotropen Musikstücken dargestellt, deren Verlauf charakteristisch für ihre jeweilige Gruppe ist.

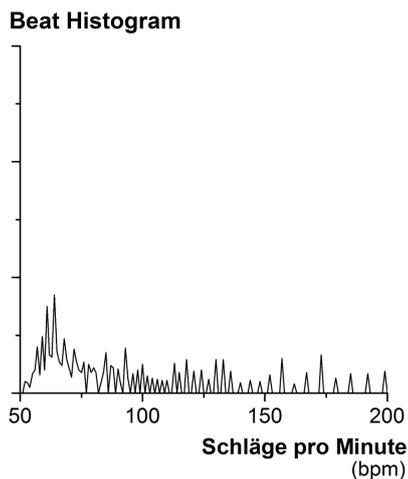
Zunächst sind auf der linken, trophotropen Seite deutlich geringere Ausschläge zu erkennen, was nicht weiter verwundert, denn der Höreindruck bekräftigt eben dies: Langsame, ruhig dahinfließende Musikstücke wie Bachs Air weisen naturgemäß weniger Rhythmus pro Zeiteinheit auf als rhythmisch stark akzentuierte Märsche wie der Radetzki-Marsch von Strauß.

Neben der Summe aller Ausschläge im Histogramm ist auch die Verteilung der Ausschläge unterschiedlich. Während sich im Bereich bis ungefähr 90 bpm kaum Unterschiede zwischen den beiden Kategorien feststellen lassen und sowohl ergotrope als auch trophotrope Musik (besonders von Bach) in diesem Bereich markante Ausschläge haben kann, dünnen die Ausschläge bei trophotroper Musik oberhalb von 90 bis 120 bpm meist sehr schnell aus.

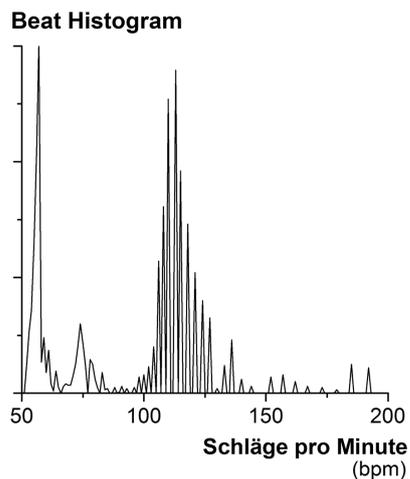
Ganz anders bei ergotroper Musik. Dort gibt es im Grunde zwei Typen: Stark rhythmisch akzentuierte Stücke haben sehr große Ausschläge bei Vielfachen des Grundschlages. In Abbildung 5.17b ist zu sehen, dass die doppelt so schnellen Viertelnoten im Bereich zwischen 110 und 115 bpm beim Radetzki-Marsch sogar noch dominanter sind als der Grundschlag von etwa 57 bpm.

Dagegen gibt es viele ergotrope Stücke wie etwa Strauss' Don Juan oder der abgebildete erste Satz aus Beethovens fünftem Klavierkonzert, deren rhythmische Struktur mit Synkopen, Triolen, rhythmisch gegeneinander spielenden Orchesterstimmen, Takt- und Tempowechseln schon so komplex komponiert sind, dass ein klarer durchgängiger Taktschlag kaum identifizierbar ist. Zudem wird das Tempo dieser Stücke vom Dirigenten oder Solisten oftmals wesentlich freier interpretiert als beispielsweise bei barocker Musik. Im Beat Histogramm sind hier (Abbildung 5.17d) viele Ausschläge bis zu den maximal detektierbaren 200 bpm zu finden, aber kein dominierender Grundschlag.

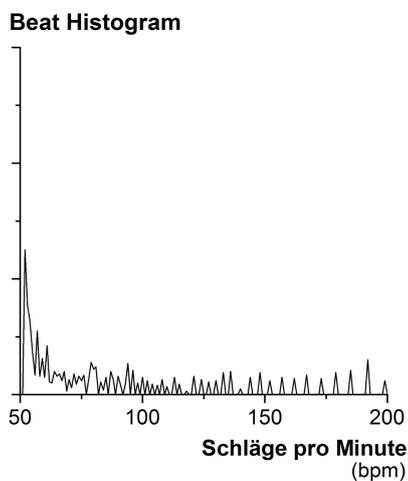
Ein weiteres relevantes Merkmal ist die Beat Strength. Dieses Kriterium, das von Tzanetakis in [189] zur Genre-Klassifizierung entwickelt wurde, indiziert wie dominant



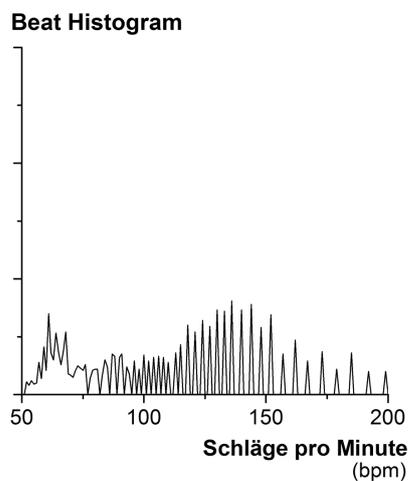
(a) Bach: Air



(b) Strauß: Radetzki-Marsch



(c) Mozart: Klavierkonzert 21/2



(d) Beethoven: Klavierkonzert 5/1

Abb. 5.17: Vier Beispiele für das Beat Histogram: links zwei trophotrope und rechts zwei ergotrope Musikstücke

der Grundrhythmus im Stück zutage tritt:

$$\textit{Beat Strength} = \frac{\text{Stärke des Maximums}}{\text{Summe aller Ausschläge}} \quad (5.21)$$

Im Gegensatz zu dieser Definition aus [189] werden in der vorliegenden Arbeit die Stärken der *drei* größten lokalen Maxima addiert und durch die Summe aller Ausschläge geteilt. Diese Modifikation hat deshalb Sinn, da die vom Beat Histogramm erfassten, rhythmischen Periodizitäten oftmals – wie in Abbildung 5.17b beim Radetzky-Marsch sichtbar – auf mehrere Notenwerte (hier Viertel-, Achtel- und die nicht mehr detektierten Sechzehntelnoten) aufgeteilt sind, sich im Höreindruck überlagern und zusammen den markanten Rhythmus bilden.

Eine Implementierung des Beat Histogramm bietet die Software Marsyas. Dabei wird, wie in Abbildung 5.17 an vier Beispielen dargestellt, das Gewicht ganzzahliger Periodizitäten zwischen 50 und 200 bmp dargestellt sowie ein Vektor mit acht charakteristischen Merkmalen extrahiert.

Es handelt sich um ein quelloffenes C++ Programm, das über das Internet von George Tzanetakis und interessierten Nutzern entwickelt wird [12], jedoch leider noch kein wirklich ausgereiftes Stadium erreicht hat.

Leider ist nicht nur die Installation problematisch, auch die Anwendung birgt einige Probleme:

- Werden die Musikstücke mit einer Abtastrate von 44,1 kHz statt den geforderten 22,05 kHz ausgewertet, entsteht ein komplett anderes – und falsches – Histogramm.
- Die Berechnungen sind nicht zeitunabhängig: Wird vor einem Musikstück eine Pause eingefügt, so ergibt sich ein (leicht) unterschiedliches Histogramm, aber unter Umständen ein deutlich anderer Merkmals-Vektor.
- Die Ergebnisse sind nicht zeitnormiert: Eine doppelt so lange Sequenz erzeugt doppelt so hohe Ausschläge im Histogramm und im Merkmalsvektor.

Der Pegel der analysierten Musikstücke zeigt keine Auswirkungen. Eine vorherige Normalisierung des Audiosignals ist also unnötig.

Da speziell der Merkmalsvektor oftmals keine wirklich reproduzierbaren Daten liefert, wurde nur die Berechnung des Beat Histogramm von Marsyas verwendet. Die darauf

basierenden Kennzahlen jedoch selbst in vergleichbarer Weise errechnet.

Ähnlich wie in [190] wird nach der zeitlichen Normierung zunächst die rhythmische Grundstruktur ausgewertet:

- Die Frequenzen der drei größten lokalen Maxima im Beat Histogramm in Schlägen pro Minute werden direkt in den Merkmalsvektor aufgenommen.
- Ebenso wird die rhythmische Stärke der drei Hauptmaxima berechnet. Dafür wird die Amplitude in einer frequenzabhängigen Umgebung jedes Maximums mit einer normierten Gaußverteilungs-Funktion gewichtet und aufsummiert. Da ein menschlich erzeugter Rhythmus nur in Ausnahmefällen exakt ein konstantes, ganzzahliges Tempo hat, also in der Regel zwischen zwei diskreten Werten liegt oder gar über das gesamte Stück – beabsichtigt oder nicht – leicht schwankt, und außerdem die Wavelet-Transformation der Heisenbergschen Unschärfetheorie unterliegt, würde die bloße Berechnung eines einzelnen bmp-Wertes den tatsächlich wahrnehmbaren Rhythmus nicht realitätsnah repräsentieren.

Daneben werden weitere Kennzahlen, die das Musikstück charakterisieren, extrahiert:

- Die Summe aller Werte im Histogramm zwischen 50 und 200 bpm liefert einen Eindruck, wie akzentuiert der Rhythmus des analysierten Musikstückes ist.
- Die Summen aller Werte zwischen 50 und 90 bpm, 90 und 140 bpm respektive 140 und 200 bpm geben ein Indiz, wie ausgeprägt langsame, mittlere und schnelle rhythmische Strukturen im analysierten Musikstück vorkommen.
- Ausgehend von diesen Teilsummen werden drei Verhältnisse als Kennzahlen ausgegeben: das Verhältnis der Summe zwischen 50 und 90 bpm zu den Summen der anderen beiden Bereiche sowie zur Gesamtsumme.
- Die oben erwähnte Beat Strength, die relative Amplitude des globalen Maximums im Vergleich zur Summe aller Periodizitäten im Beat Histogramm, zeigt an, wie dominant der Grundrhythmus zutage tritt.
- Daneben wird auch noch die Beat Strength bezogen auf die drei größten lokalen Maxima berechnet.

Die statistische Bewertung dieser Merkmale ist allerdings enttäuschend. Am Besten schneidet noch die Amplitude des absoluten Maximums mit einem Wilks'schen Lambda von 0,81 ab. Auch die Bewertung der Beat Strength ergibt ein durchmisches Bild: Es sind zwar Muster erkennbar, etwa dass Beethoven mit seinem sehr diversifizierten Rhythmus eher im unteren Bereich liegt, während Bachs Musik eher einen rigiden Rhythmus und damit eine hohe Beat Strength aufweist – über trophotrope oder nicht-trophotrope Musik sagt das allerdings nichts aus.

Speziell die Lage der Hauptmaxima ist zwischen ergotroper und trophotroper Musik kaum zu unterscheiden: Von wenigen Ausnahmen abgesehen liegt es immer bei etwa 60 oder 120 Schlägen pro Minute.

Möglicherweise ist das ein Indiz für die zu Anfang von Abschnitt 5.2.1.3 angesprochene Theorie von Moelants, dass der menschliche Körper auf diese Frequenz besonders anspricht. Offenbar ist diese Frequenz sowohl dazu notwendig, einen Menschen durch Musik zu aktivieren, als auch, ihn zu beruhigen. Zumindest deutet es darauf hin, dass so viele Musiker genau in diesem Tempo musizieren und so viele Komponisten genau dieses Tempo vorsahen.

Zusammenfassung Rhythmus-basierte Merkmale

Die Komplexität des Rhythmus, die Dauer von Betonungen und Pausen in einer Periode sowie die Periodizität des (vermuteten) Grundschlages selbst lässt sich mit den Methoden der Signalverarbeitung unter einigen Schwierigkeiten ermitteln – wie sich Grundschlag, Akzentuierung und Takt jedoch relativ zueinander verhalten und vor allem wie das dann klingt, kann keiner der untersuchten Merkmalsextraktions-Algorithmen berechnen. Ob zum Beispiel immer der zweite und vierte Schlag eines Viervierteltaktes betont werden, was zu einem eher beschwingten und dynamischen Rhythmus führt, oder der erste und dritte Schlag, was eher schwer und marschartig klingt, kann wohl zur Zeit nur das menschliche Gehör mit Bestimmtheit sagen.

Die am Anfang des Abschnittes erläuterte Theorie, dass wir Menschen besonders auf Tempi ansprechen, die mit den körpereigenen Resonanzfrequenzen übereinstimmen, kann gut nachvollzogen werden. Allerdings handelt es sich hierbei wohl eher um eine „notwendige Bedingung“, damit uns Musik emotional anspricht und weniger um das gesuchte Unterscheidungsmerkmal zwischen ergotroper und trophotroper Musik.

5.2.1.4 Harmonische Merkmale

Die Harmonik¹⁴ ist der musikalische Parameter, der die vertikale Komponente von Musik, also den Zusammenklang der enthaltenen Frequenzen, abbildet. Vereinfacht lässt sich sagen, dass wir zwei Töne als umso wohlklingender wahrnehmen, je mehr deren Obertöne übereinstimmen.

Somit werden insbesondere die musikalischen Intervalle Oktave (Verhältnis 2:1) und Quinte (Verhältnis 3:2) mit ihren einfachen, ganzzahligen Frequenzverhältnissen als konsonant¹⁵ empfunden. Frequenzverhältnisse mit „hohen“ Zahlen, etwa die Sekunde (Verhältnis 16:15), werden dagegen als dissonant¹⁶ wahrgenommen. Alle Intervalle, die je nach musikalischem Kontext sowohl als konsonant als auch als dissonant empfunden werden können, werden als asonant¹⁷ bezeichnet.

Auch wenn diese Erkenntnisse seit mehreren tausend Jahren gültig sind, zeigt sich doch speziell bei den heute unter „asonant“ zusammengefassten Intervallen, dass die harmonische Wahrnehmung nicht oder zumindest nicht ausschließlich „naturgegeben“ ist. So wurden einige Intervalle in verschiedenen Epochen unterschiedlich empfunden. Zum Beispiel wurden die Terzen im Mittelalter noch als völlig dissonant angesehen, erst ab dem Barock nehmen wir sie konsonant wahr. Genau das Gegenteil war bei den Quartanen der Fall: Galten diese im Mittelalter als höchst konsonant, wurden sie in der barocken Musik als Dissonanz, die aufgelöst werden musste, angesehen. Heutzutage sieht es etwa im Jazz wieder ganz anders aus. Auch die grundverschiedene Harmonik unterschiedlicher Kulturkreise deutet sehr stark darauf hin, dass harmonische Wahrnehmung zumindest zum Teil erlernt wird. Es ist also gut möglich, dass die folgenden harmonischen Merkmale und ihr Einfluss auf eine Senkung des Blutdruckes nur für Menschen unseres Kulturkreises überhaupt eine Bedeutung haben.

Grundfrequenz-Analyse

Viele der harmonischen Merkmale basieren auf der Analyse der jeweiligen Grundfrequenz¹⁸. Vor allem in Werken der Wiener Klassik wird diese oft durch die Basslinie

¹⁴ harmonia (griech.): Zusammenfügung

¹⁵ con- (lat.): zusammen; sonare (lat.): klingen

¹⁶ dis- (lat.): unterschiedlich

¹⁷ a- (griech.): un-

¹⁸ auch Grundschwingung oder Grundton bzw. (engl.) fundamental frequency

vorgegeben. In der Regel – etwa bei Barockmusik, wo vielfach auch der Bass eine eigene, kontrapunktische Stimme darstellt – ist die Bestimmung komplizierter und als Grundfrequenz zählt diejenige, zu der alle erklingenden Töne am Besten harmonieren, also Obertöne sein könnten. Ob die Grundfrequenz dabei wirklich erklingt oder nur virtuell vorhanden ist, wird nicht unterschieden und ist auch nicht von Relevanz, da der menschliche Hörsinn diese *virtuelle Tonhöhe* ohnehin hinzufügen würde.

Zur Erkennung der Grundfrequenz wurde der Algorithmus aus einer Arbeit an der Technischen Universität Berlin [30] adaptiert. Dieser basiert auf der Maximum-Likelihood-Methode, die in [47] als für die Grundfrequenzbestimmung geeignet beschrieben wird. Zuerst werden die tiefen Frequenzen mit einem Tiefpassfilter verstärkt, da zum Beispiel beim Klavier die unterste Oktave deutlich weniger Energie hat als die höheren Töne. Nach dieser Vorverarbeitung wird das Spektrum des Signals berechnet und aus diesem alle lokalen Maxima gesucht, die um mehr als einen bestimmten Schwellenwert aus ihrer Umgebung hervortreten.

Von diesen Maxima wird mit einem Maximum-Likelihood-Schätzer (mathematische Details sind in [48] zu finden) nun eines als Grundfrequenz ausgesucht. Die Wahrscheinlichkeit, die Grundfrequenz zu sein, erhöht sich

- je höher die Amplitude der Frequenz ist,
- je mehr die restlichen Maxima als Obertöne dazu passen würden und
- je geringer die Frequenz des Frequenzmaximums ist.

Außerdem wird die Varianz der letzten fünf Grundfrequenzwerte berechnet und so vor der Ausgabe überprüft, ob die neu erkannte Frequenz zum bisherigen musikalischen Kontext passen kann.

Dieser Algorithmus erzielte sowohl bei der Evaluierung in [30] sowie in eigenen Versuchen eine annehmbar gute Trefferrate. Der am häufigsten vorkommende Fehler, dass die Grundfrequenz um eine Oktave zu tief erkannt wird, ist für die hier extrahierten Merkmale irrelevant.

Die durchschnittliche Grundfrequenz des Musikstückes an sich führt mit einem Wilks'schen Lambda von 0,93 zu keinerlei erkennbarer Entscheidungshilfe im Bezug auf blutdrucksenkende Musik, jedoch ist sie Basis für die Berechnung der folgenden harmonischen Merkmale.

Inharmonicity

Die Inharmonizität nach Peeters [153] beschreibt die Divergenz eines Signals im Vergleich zu einem rein harmonischen Signal derselben Grundfrequenz f_0 .

In Anlehnung an die Definition von Peeters [153] und die in [184] eingeführte Harmonische Konzentration wird das Frequenzspektrum mit der in Abbildung 5.18 gezeigten Funktion aus Dreiecksfiltern $G(f)$ gewichtet. Diese Dreiecksfilter haben ihr jeweiliges Minimum bei den Obertönen $h(n)$, so dass die harmonischen Komponenten ausgeblendet werden und sich die Inharmonizität

$$\text{Inharmonizität} = \frac{\sum_f S(f) \cdot G(f)}{\sum_f G(f)} \quad (5.22)$$

berechnen lässt.

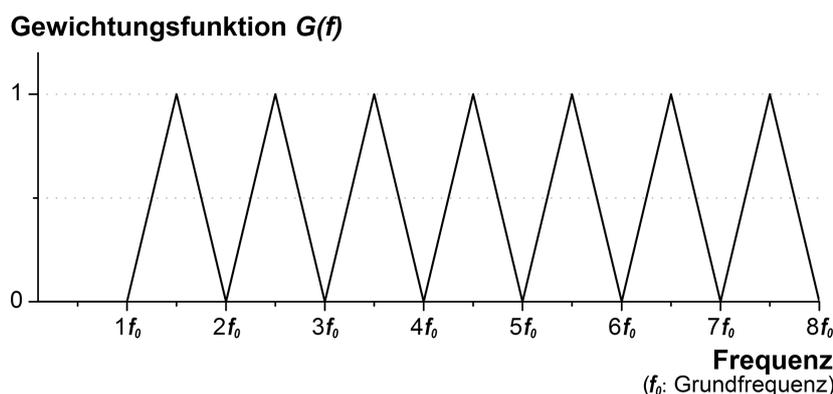


Abb. 5.18: Gewichtungsfunktion für die Inharmonizität

Bei der Anordnung alle Musikstücke nach ihrer Inharmonizität, ergibt sich – mit Stücken wie der Filmmusik von *Pirates of the Caribbean* als Extrem auf der Seite der Inharmonizität und vor allem solistischen Werken der Wiener Klassik auf Seite der Harmonizität eine logisch plausible Anordnung der ergotropen und trophotropen Musikstücke mit $\Lambda = 0,74$ (siehe Abbildung 5.11c).

Wenig verwunderlich stehen die Klavierstücke von Satie, eines harmonisch relativ kühnen Komponisten der Spätromantik, am unharmonischen Ende der trophotropen Stücke. Ebenfalls völlig deckungsgleich mit dem Höreindruck beginnt dann der Block der ergotropen Stücke mit relativ harmonisch klingenden Stücken von Mozart und Saint-Saens.

Auf den ersten Blick merkwürdig erscheint nur die Air von Bach, ein trophotropes Stück, das als Ausreißer zwischen den ergotropen Musikstücken sehr weit im unharmonischen Bereich liegt.

Doch dieser mutmaßliche Widerspruch löst sich beim Blick in die Partitur: So war Bach ein Meister der harmonischen Verschiebungen, was sich im *Dona nobis pacem* beziehungsweise *Et in Spiritum sanctum* seiner h-moll-Messe zeigt. In den letzten Minuten wird die Fuge durch alle Tonarten moduliert und drängt durch Quart-, Sext- und Septakkorde ständig zum Schluss – bis dann nach langer Zeit endlich der Tonika-Abschluss kommt. Mit einer Inharmonizität von fast 3,2 in den letzten neunzig Sekunden (das entspricht der zweieinhalbfachen Standardabweichung über dem Mittelwert) würde sich dieses Stück – obwohl von seinem grundsätzlichen Duktus eher trophotrop – sofort an die Spitze der unharmonischen Musikstücke schieben.

Auch die Air weist eine ähnliche Struktur auf: Während die Oberstimmen die polyphonen Melodien und Harmonien tragen, gibt es eine unabhängige Basslinie aus auf- und absteigenden Ganz- und Halbtönen, die für harmonische Spannung sorgt und sich beim Hören völlig „normal“ anhört, in Formel 5.22 jedoch zu einer großen Inharmonizität führt.

Eine bessere Unterscheidungsmöglichkeit ist die Standardabweichung der Inharmonizitäts-Verteilung über die einzelnen Zwei-Sekunden-Abschnitte mit $\Lambda = 0,67$ sowie der Maximalmalwert der Inharmonicity mit $\Lambda = 0,70$.

Odd-to-even Harmonic Energy Ratio

Diese Kennzahl berechnet das Verhältnis von geradzahligen und ungeradzahligen Harmonischen [153]. Je nachdem, ob ein Lambda-Viertel-Resonator, wie etwa eine Klarinette, oder ein Lambda-Halbe-Resonator, wie zum Beispiel eine Trompete, erklingt, kommen nur bestimmte Harmonische vor. Dieses Kriterium eignet sich zur Untersuchung der Instrumentierung, bringt mit $\Lambda = 0,87$ für unsere Aufgabe aber keinen Erkenntnisgewinn.

Harmonic Spectral Deviation

Dieses Verhältnis beschreibt, wie stark sich die Amplitudenspitzen der Obertöne von der spektralen Einhüllenden S_H unterscheiden [153]. Zunächst wird die spektrale Einhüllende über eine Tiefpassfilterung gewonnen. Mit N (maximal neun) Obertönen über

dem Grundton f_0 wird nun der Frequenzvektor

$$\vec{f}(n) = [f_0, 2 \cdot f_0, \dots, N \cdot f_0]^T \quad (5.23)$$

gebildet und anschließend die

$$\text{Harmonic Spectral Deviation} = \frac{1}{N} \cdot \sum_n \left(S(\vec{f}(n)) - S_H(\vec{f}(n)) \right) \quad (5.24)$$

für jeden Zeitpunkt als Differenz des tatsächlichen Spektrums $S(f)$ mit der Einhüllenden $S_H(f)$ an den N Frequenzpunkten von $\vec{f}(n)$ berechnet.

Die Ergebnisse dieses Merkmals sind recht bescheiden – einzig der Minimalwert ist mit einem Wilks'schen Lambda von 0,85 noch ein annehmbar gutes Merkmal.

Tristimulus

Der Tristimulus nutzt die Tatsache, dass in der Regel vor allem die ersten Harmonischen die Klangfarbe wesentlich beeinflussen. Ursprünglich stammt diese Größe aus der Farbwahrnehmung, wo sie beschreibt, wie aus den drei Grundfarben eine neue Farbe gemischt werden kann. Analog werden drei Tristimulus-Messungen definiert, deren erste die Amplitude der Grundfrequenz (oder ersten Harmonischen) in Relation zur Summe aller Amplituden $h(n)$ setzt:

$$T_1 = \frac{h(1)}{\sum_{n=1}^N h(n)} \quad (5.25)$$

Die zweite Messung addiert die Amplitude der zweiten, dritten und vierten Harmonischen während die dritte alle weiteren Partialtöne summiert:

$$T_2 = \frac{h(2) + h(3) + h(4)}{\sum_{n=1}^N h(n)} \quad T_3 = \frac{\sum_{n=5}^N h(n)}{\sum_{n=1}^N h(n)} \quad (5.26)$$

Die Idee des Tristimulus ist es, aus diesen drei Komponenten eine Klangfarbe wie eine optische Mischfarbe zusammenzusetzen. Außerdem kann das zeitabhängige Verhalten der drei Komponenten leicht in einem kartesischen Koordinatensystem dargestellt werden, um so Einschwingvorgänge und eingeschwungene Zustände sowie deren Relation zu beobachten. Auf diese Weise sind Orgelregister, aber genauso Streicher, Holz- und Blechblasinstrumente unterscheidbar [160]. Peeters wendet diese Methode auch auf allgemeine Audiosignale an [153].

Während sich T_1 und T_2 als nicht signifikant erwiesen haben, liefert der dritte Wert T_3 mit $\Lambda = 0,76$ sowie dessen Standardabweichung mit $\Lambda = 0,84$ gute Ergebnisse.

Noisiness

Die Verrauschtheit („Noisiness“) ist das Verhältnis aus dem Rauschen, das als nicht-harmonischer Anteil interpretiert wird, und der gesamten Signalenergie:

$$\text{Noisiness} = \frac{\text{Energie Rauschen}}{\text{Gesamtenergie}} = \frac{1 - \sum_n S(h(n))}{\sum_f S(f)} \quad (5.27)$$

Die auf Verrauschtheit basierenden Kennzahlen sind allerdings nicht signifikant für die Unterscheidung blutdrucksenkender Musik.

Die folgenden harmonischen Merkmale basieren nun nicht mehr auf der oben besprochenen Grundfrequenz-Analyse.

Sonanz

Beim Studium der Spektrogramme stellt man fest, dass während konsonant klingender Phasen oft die einzelnen Obertöne in einem regelmäßigen Streifenmuster identifizierbar sind (vergleiche Sekunde 15 in Abbildung 4.7 auf Seite 97). Speziell bei Soloinstrumenten und Schlussakkorden tritt dieser Effekt sehr stark auf.

In dissonanten Phasen sind einzelne Partialtöne im Spektrogramm dagegen kaum auszumachen und die Energie verteilt sich auf viele Frequenzen gleichzeitig.

Diese Beobachtung führt zur Annahme, dass die „Welligkeit“ des Spektrums eine Information über die Harmonizität des Klanges enthält. Eine Möglichkeit, diese Welligkeit zu messen, ist die Steigung – also die erste Ableitung – der spektralen Hüllkurve über alle Frequenzen zu summieren. Da diese im absoluten Maßstab bei niedrigen Pegeln grundsätzlich geringer als bei hohen Pegeln ist, wird die Summe mit dem Frequenzpegel normiert, so dass sich für die Sonanz nach Kohler ergibt [104]:

$$\text{Sonanz} = \frac{\sum_f \left| \frac{dS(f)}{df} \right|}{\sum_f S(f)} \quad (5.28)$$

Das Ergebnis bestätigt die Annahme. Die viel konsonanter klingenden trophotropen Musikstücke haben überwiegend hohe Sonanz-Wert, vor allem solistisch geprägte Stücke sind am oberen Ende zu finden: Klavierkonzerte, dann sämtliche trophotropen Stücke für Klavier solo und schließlich Händels Menuett für Blechbläser und die beiden Orgelstücke von Brahms. Sowohl Blechbläser als auch die Orgel, bei der die Register ja genau so eingestimmt sind, dass sich ihre Obertöne überlagern und einen farbenreichen

Mischklang bilden können, sind Instrumente, bei denen in der Regel eher wenige, aber dafür wohldefinierte Obertöne ausgebildet sind, während ansonsten nichts mitklingt. Auch der ergotrope Block ist relativ kompakt mit einigen Ausreißern – wieder vornehmlich Klavierkonzerte und Stücke für Klavier solo. Trotzdem ist dieses Merkmal mit Wilks' Lambda von 0,36 eines der besten überhaupt und damit ein wertvolles Indiz für blutdrucksenkende Musik.

Auch der Maximal- und Minimalwert der zeitlichen Verteilung der Sonanz sind mit $\Lambda = 0,64$ und $\Lambda = 0,56$ gut trennende Merkmale.

Spectral Flatness

Eine weitere Größe, die sich mit der Welligkeit oder Glattheit des Spektrums beschäftigt, ist die Spectral Flatness. Sie prüft, wie sehr das Spektrum dem einer Sinusschwingungen ähnelt. Dazu wird für definierte Frequenzbänder der geometrische Mittelwert durch den arithmetischen Mittelwert dividiert [153]:

$$\text{Spectral Flatness} = \frac{\left(\prod_{f_{min}}^{f_{max}} S(f)\right)^{1/k}}{\frac{1}{k} \cdot \sum_{f_{min}}^{f_{max}} S(f)}, \quad \text{mit } k : \text{Anzahl Summanden bzw. Faktoren} \quad (5.29)$$

Für sehr tonale Signale wie einen Sinuston setzt sich das Spektrum nur aus wenigen diskreten Linien zusammen; das geometrische Mittel im Zähler wird null und die Spectral Flatness somit auch. Bei einem reinen Rauschsignal, in dem alle Frequenzen gleich stark enthalten sind, nähert sich das geometrische Mittel seinem Maximalwert, dem des arithmetischen Mittels, an und die Spectral Flatness ist fast eins.

Um die Flachheit des Spektrums in verschiedenen Abschnitten der Frequenzachse separat bewerten zu können, wurden die in Tabelle 5.2 gegebenen sechs Frequenzbänder definiert. Jedes ist genau 400 mel beziehungsweise 4 bark breit (siehe Abschnitt 5.2.1.1).

Während das sechste Frequenzband nur wenig nützliche Informationen enthält, da viele Musikstücke beider Klassen in diesem hohen Frequenzbereich nicht mehr alle Frequenzen enthalten, das Spektrum also ausgesetzt ist und die Spectral Flatness bei vielen Stücken null ist, liefern die anderen Frequenzgruppen gute bis sehr gute Ergebnisse. Im ersten Band liegt Λ bei 0,51 – hier dominiert vor allem die oben besprochene

Band	f_{min}	f_{max}
1	0 Hz	400 Hz
2	400 Hz	920 Hz
3	920 Hz	1 720 Hz
4	1 720 Hz	3 150 Hz
5	3 150 Hz	6 400 Hz
6	6 400 Hz	15 500 Hz

Tab. 5.2: Sechs Frequenzbänder für die harmonischen Merkmale

Grundfrequenz, so dass die harmonischen Unterschiede zwischen ergotroper und trophotroper Musik noch nicht so stark hervortreten. Das hauptsächlich stimmführende zweite und dritte Band haben mit $\Lambda = 0,27$ und $\Lambda = 0,39$ sehr gute Werte.

Die Spectral Flatness im zweiten Frequenzband ist das am besten trennende Merkmal überhaupt. In Abbildung 5.11d ist die Sortierung der Musikstücke nach diesem Merkmal dargestellt. Das einzige Stück, das sich nicht im richtigen Block befindet, ist Khachaturians Adagio aus der Spartacus-Suite. Beim Anhören dieses Stückes ist festzustellen, dass der erste Teil zwar bestens zu Decker-Voigts Beschreibung trophotroper Musik passt, im zweiten Teil jedoch einige harmonisch kühnere Passagen die musikalische Spannung steigern, bevor das Stück wieder ruhig endet. Wird dieser Teil herausgeschnitten und lediglich der Rest analysiert, landet auch das Spartacus-Adagio mitten im Block der trophotropen Musikstücke (vergleiche Abschnitt 5.2.2.4).

Tonality

Ein aus der Spectral Flatness abgeleitetes Merkmal ist der sogenannte Tonalitätskoeffizient [153]. Er ergibt sich aus dem Minimum von 1 und der Spectral Flatness in der Einheit Dezibel geteilt durch -60 :

$$\begin{aligned}
 \textit{Tonality} &= \min \left(\frac{\textit{Spectral Flatness}_{dB}}{-60} \mid 1 \right) \\
 &= \min \left(\frac{10 \cdot \log(\textit{Spectral Flatness})}{-60} \mid 1 \right)
 \end{aligned} \tag{5.30}$$

Für tonale, sinusähnliche Signale nähert sich der Tonalitäts-Koeffizient an eins an, für verrauschte Signale ist er fast null.

Der Koeffizient wird für die ersten drei Frequenzbänder berechnet, wobei das zweite wiederum das beste Resultat liefert. Mit $\Lambda = 0,57$ ergibt sich ein passables, aber kein gutes Trennungsergebnis.

Spectral Crest Factor

Der Spectral Crest Factor¹⁹ setzt die Frequenz mit dem höchsten Pegel in Relation zum durchschnittlichen Pegel [153]:

$$\text{Spectral Crest Factor} = \frac{\max(S(f), f \in [f_{min}, f_{max}])}{\frac{1}{k} \cdot \sum_{f_{min}}^{f_{max}} S(f)} \quad (5.31)$$

Um das Spektrum wieder in mehreren Bereichen auswerten zu können, wurden dieselben Frequenzbänder wie für die Spectral Flatness verwendet (Tabelle 5.2).

Ähnlich wie bei der Spectral Flatness sind auch hier die Ergebnisse für das sechste Frequenzband nicht signifikant, da insgesamt zu wenige Frequenzen über 6,4 kHz in den Signalen enthalten sind. Die besten Ergebnisse liefern die mittleren Bänder, vor allem das zweite mit $\Lambda = 0,35$ – dem zweitbesten von einem Merkmal erreichten Wert.

Chromabasierte Merkmale

Die chromabasierten Extraktions-Algorithmen versuchen aus dem Tonsignal die gespielten Töne herauszufinden und ein sogenanntes Chromagramm zu erstellen. Dazu wird die Energieverteilung des Audiosignals über die Frequenzen analysiert und in zwölf Chromabändern unterteilt, die mit den zwölf Halbtönen der chromatischen Tonleiter korrespondieren [144].

Mit dieser Information kann sowohl der Verlauf der einzelnen Stimmen als auch deren Zusammenklang, die Harmonik, untersucht werden.

Ein Extraktionsalgorithmus wurde von Meinard Müller unter anderem für den Sync-Player entwickelt, eine Software, die verschiedene Interpretationen eines Werkes zeit-synchronisiert wiedergibt und optisch darstellt [145]. Dieser ist leider nicht öffentlich. Alle frei verfügbaren Algorithmen zur Erkennung der Tonhöhe arbeiten bei mehrstimmigen Passagen – die ja die Regel sind – sehr schlecht und sind für den Zweck dieser Arbeit unbrauchbar.

¹⁹ crest (engl.): Scheitelpunkt

Da sowohl die Dynamik innerhalb einer Stimme als auch die Harmonizität des Klanges durch andere Merkmale mit gutem Ergebnis überprüft werden können, wird auf die Analyse der exakten Tonhöhe hier verzichtet. Diese mag zwar für die Genreanalyse und speziell für die Erkennung des Musikstückes aus dem Tonsignal substanziell sein, für die Unterscheidung trophotroper von ergotroper Musik ist allenfalls ein kleiner zusätzlicher Erkenntnisgewinn zu erwarten.

Zusammenfassung Harmonische Merkmale

Die Harmonischen Merkmalsextraktions-Algorithmen liefern die Merkmale mit dem geringsten Wilks'schen Lambda, also der besten Trennungsschärfe, überhaupt. Die Spectral Flatness im zweiten analysierten Frequenzband ist sogar, von einem erklärbaren Ausreißer abgesehen, allein in der Lage, ergotrop und trophotrop wirkende Musik zu differenzieren. Das macht deutlich, wie wichtig konsonante Klänge für eine blutdrucksenkende Wirkung sind – vor allem in den mittleren, stimmführenden Tonlagen.

5.2.1.5 Basismerkmale im Zeitbereich

Unter der Rubrik „Basismerkmale“ sind Merkmale gelistet, die sich direkt aus dem Zeitsignal oder dem Spektrum (Abschnitt 5.2.1.6) berechnen lassen und oft eine so elementare Beschreibung der physikalisch gemessenen Größen sind, dass eine eindeutige musikalische Interpretation nur schwierig möglich ist.

Zero-Crossing Rate

Die Zero-Crossing Rate zählt die Nulldurchgänge der Amplitude pro Zeit und ist ein in der Genre-Klassifikation viel verwendetes Merkmal, etwa in [37] oder [99]. Das Merkmal zeigt eine starke Korrelation mit dem Schwerpunkt des Spektrums (Spectral Centroid, Abschnitt 5.2.1.6) beziehungsweise der psychoakustischen Größe Schärfe (Abschnitt 5.2.1.1), da Signale mit stark hochfrequentem Anteil sowie verrauschte Signale deutlich mehr Nulldurchgänge aufweisen.

Bei der Anordnung aller gewählten Musikstücke nach diesem Kriterium, ist zu erkennen, dass mit $\Lambda = 0,71$ zwar in begrenztem Umfang ergotrope und trophotrope Musik getrennt werden kann, ein stärkerer Einflussfaktor jedoch die jeweilige Instrumentierung ist: Orgel- und Klaviermusik führt das Feld, gefolgt von allen Stücken

für Klavier und Orchester, an. Mit ihren relativ wenigen Obertönen haben sie eine geringe Zero-Crossing Rate, während sowohl trophotrope Streicher- oder vollbesetzte Orchesterwerke als auch ergotrope Musik eine sehr hohe Zero-Crossing Rate aufweisen – speziell dann, wenn noch unharmonische Instrumente, wie Trommeln und Becken, dazu kommen, was vor allem bei ergotropen Stücken der Fall ist und so unter anderem die Trennungswirkung der Zero-Crossing Rate erklärt.

Autokorrelation

Die Autokorrelationsfunktion

$$x_{corr}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s(n+k) \cdot s(n) \quad (5.32)$$

vergleicht das Eingangssignal $s(t)$ mit sich selbst und ist damit ein Maß für die Ähnlichkeit eines Signals mit sich selbst. Laut Peeters [153] sind vor allem die ersten zwölf Koeffizienten der Autokorrelationsfunktion $x_{corr}(1)$ bis $x_{corr}(12)$ als Unterscheidungskriterium geeignet.

Tatsächlich variieren die Werte der Koeffizienten zwischen den Musikstücken um drei Größenordnungen. Sehr niedrige Ergebnisse sind zwar nur trophotropen Musikstücken zu eigen, im höheren Bereich zeigt sich eine lockere Durchmischung ergotroper und trophotroper Musik, was zum schlechten Wert von $\Lambda = 0,92$ führt. Zudem korrelieren alle zwölf berechneten Koeffizienten sehr stark, so dass nur der erste für die Klassifizierung herangezogen werden kann.

Root-Mean-Square Value

Der Root-Mean-Square Value gibt die Energie – das Quadrat der Signalamplitude – jedes Signalframes an [37]:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=0}^T s(t)^2} \quad (5.33)$$

Dieses Merkmal ist korreliert mit den Autokorrelationskoeffizienten und erreicht mit 0,87 ein leicht besseres Wilks'sches Lambda.

5.2.1.6 Basismerkmale im Spektralbereich

Spectral Centroid

Der Spectral Centroid oder erste Moment der (Frequenz-) Verteilung beschreibt den Schwerpunkt des Spektrums und berechnet sich gemäß [116] zu

$$c(t) = \frac{\sum_{f=0}^{f_s/2} f \cdot |S(f, t)|^2}{\sum_{f=0}^{f_s/2} |S(f, t)|^2}. \quad (5.34)$$

Er wird zum einen für jedes Zeitframe gebildet und dann gemittelt und zum anderen aus dem Gesamtspektrum des Stückes errechnet. Außerdem wird er gemäß [184] mit einer logarithmischen Frequenzgewichtung berechnet, um so der nicht-linearen Tonhöhenempfindung des Gehörs Rechnung zu tragen.

Während die logarithmische Gewichtung keine signifikanten Ergebnisse liefert, liegt Wilks' Lambda mit 0,80 für die lineare Berechnung im grünen Bereich. Eine wirkliche Trennung zwischen ergotropen und trophotropen Musikstücken lässt sich mit diesem Merkmal allerdings nicht erreichen.

Der Spectral Centroid hängt maßgeblich von der Instrumentierung ab. Ähnlich wie bei den korrelierten Merkmalen Schärfe und Zero-Crossing Rate, ist der Schwerpunkt von vollinstrumentierten, Streicher-intensiven Musikstücken auf der Frequenzskala höher als bei Tasten-, Pfeifen- oder Blasinstrumenten.

Bandbreite

Nach [116] und [153] wird die Bandbreite als Varianz um den oben berechneten Schwerpunkt $c(t)$ als zweites Moment der Frequenzverteilung

$$b(t)^2 = \frac{\sum_{f=0}^{f_s/2} (f - c(t))^2 \cdot |S(f, t)|^2}{\sum_{f=0}^{f_s/2} |S(f, t)|^2} \quad (5.35)$$

definiert. Dahingegen definiert [184] nicht nur wie oben erwähnt den Spectral Centroid, sondern auch die Bandbreite in der Frequenz logarithmisch, was allerdings auch hier kaum signifikante Ergebnisse bringt.

Mit der Bandbreite am oberen Ende liegen Musikstücke mit Instrumenten, die zwei-dimensional und damit stark unharmonisch schwingen, etwa Trommeln oder Becken, sowie schrille Violinstimmen, die Obertöne bis in höchste Frequenzbereiche erzeugen. Da diese Instrumentierung tendenziell eher bei ergotropen Musikstücken gegeben ist,

gehört die Bandbreite nach 5.35 mit $\Lambda = 0,64$ zu den besseren Merkmalen.

Daneben gibt es noch die Definition des Spectral Spread, der auf die Normierung im Nenner von 5.35 verzichtet, aber keine so guten Klassifizierungsergebnisse bringt.

Spectral Skewness

Die Schiefe oder Skewness des Spektrums zeigt die Asymmetrie der spektralen Verteilung an und wird über deren drittes Moment

$$m_3(t) = \frac{\sum_{f=0}^{f_s/2} (f - c(t))^3 \cdot |S(f, t)|^2}{\sum_{f=0}^{f_s/2} |S(f, t)|^2} \quad (5.36)$$

berechnet, wobei $c(t)$ das in 5.34 hergeleitete erste Moment (Schwerpunkt) zum Berechnungszeitpunkt t ist. Daraus und aus der in 5.35 errechneten Varianz lässt sich nun die Skewness

$$skewness(t) = \frac{m_3(t)^3}{b(t)^3} \quad (5.37)$$

bestimmen. Ein Wert von null zeigt die Symmetrie der Verteilung um ihren Schwerpunkt an. Werte kleiner null bedeuten, dass mehr Energie rechts des Schwerpunktes zu finden ist, Werte größer null zeigen ein Übergewicht auf der linken, niederfrequenten Seite. Letzterer Fall trifft auf alle analysierten Musikstücke mehr oder weniger zu.

Mit diesem Kennwert entstehen mehrere größere ergotrope und trophotrope Gruppen, ohne dass dabei allerdings ein genereller Trend festzustellen ist. Tendenziell sind ergotrope Stücke eher im mittleren Bereich, während sich die trophotropen in den Extremen finden lassen – entsprechend schlecht ist $\Lambda = 0,93$.

Spectral Kurtosis

Die Kurtosis einer Verteilungsfunktion berechnet sich aus deren vierten Moment

$$m_4(t) = \frac{\sum_{f=0}^{f_s/2} (f - c(t))^4 \cdot |S(f, t)|^2}{\sum_{f=0}^{f_s/2} |S(f, t)|^2} \quad (5.38)$$

zu

$$kurtosis(t) = \frac{m_4(t)^4}{b(t)^4} \quad (5.39)$$

wobei $c(t)$ und $b(t)$ wieder die in Gleichung 5.34 und 5.35 definierten Momente ersten respektive zweiten Grades sind [153]. Die Kurtosis ist eine Kenngröße für die Flachheit der Verteilung um deren Mittelwert. Werte kleiner als drei stehen für eine im Bezug zur Normalverteilung flacheren Spitze; Werte über drei für eine steilere Spitze. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p > 0,10$ müssen die Merkmale der Kurtosis als nicht-signifikant verworfen werden.

Die vier Momente beschreiben verschiedene Aspekte der Form des Spektrums und geben gewisse Rückschlüsse etwa auf die Instrumentierung des Musikstücks. Zur Separierung blutdrucksenkender Musik nützen sie jedoch – von der Bandbreite als einzigem abgesehen – nicht.

Zum einen liegt daraus der Schluss nahe, dass die Instrumentierung keinen entscheidenden Einfluss auf die Klassifizierung trophotroper und nicht trophotroper Musik hat, zum anderen kann so vielleicht besser nachvollzogen werden, warum die in Abschnitt 4.2.2.1 beschriebenen Untersuchungen der Spektrogramme keine greifbaren Ergebnisse brachten: Die Spektren sind einfach viel zu verschieden, ohne dass darin eine Aussage über die musikalische Wirkung ableitbar wäre.

Spectral Roll-off Frequency

Die Roll-off Frequenz ist die jeweilige Frequenz eines Spektrums, unterhalb der sich der Anteil h der Energie befindet. Li definiert sie in [116] zu

$$SRF = \max \left(f_{roll-off}, \sum_{f=0}^{f_{roll-off}} S(f) < h \cdot \sum_{f=0}^{f_s/2} S(f) \right) \quad (5.40)$$

und wählt $h = 0,92$. In anderen Veröffentlichungen, etwa [153] wird $h = 0,95$ gewählt, was aber für das Ergebnis keinen Unterschied macht.

Die Roll-off Frequenz ist bei stimmhaften und stimmlosen Lauten der gesprochenen Sprache deutlich verschieden, weshalb sie in der Spracherkennung eingesetzt wird. Bei der Anwendung auf unsere Musikauswahl liegt Λ um 0,70, was einer mittleren Trennqualität des Merkmals entspricht.

Spectral Decrease

Peeters definiert in [153] zwei Berechnungsmethoden für den Abfall der spektralen Hüllkurve mit zunehmender Frequenz, von denen der Spectral Decrease zu

$$SD_t(t) = \frac{1}{\sum_{f=0}^{f_s/2} S(f, t)} \cdot \sum_{f=0}^{f_s/2} \left(S(f, t) - 2 \cdot \frac{\sum_{f=0}^{f_s/2} S(f, t)}{b(t)} \right) \quad (5.41)$$

modifiziert in dieser Arbeit verwendet wird. Auch hier lassen sich keine genauen Unterscheidungen zwischen den beiden Klassen treffen. Mit Λ in der Größenordnung über 0,91 Prozent sind die meisten vom Spectral Decrease abgeleiteten Kennzahlen nicht signifikant.

Band Energy Ratio

Diese Kennzahl beschreibt die Energie in einem bestimmten Frequenzband im Vergleich zur gesamten Signalenergie. Es gibt eine Reihe von Definitionen, von denen hier die von Li [116] verwendet wird:

$$BER(t) = \frac{\sum_{f=0}^h S(f, t)}{\sum_{f=0}^{f_s/2} S(f, t)} \quad (5.42)$$

Die Bandgrenze h wird zu $f_s/8$ gewählt und somit das unterste Viertel des Spektrums bis zu einer Frequenz von 5512,5 Hz betrachtet.

Es zeigt sich, dass bei allen getesteten Werken fast die gesamte Energie (mehr als 98 Prozent) im untersten Frequenzviertel zu finden ist – bei trophotroper Musik vielleicht etwas weniger als bei ergotroper –, mehr als ein allgemeiner Trend ist aus diesem nicht signifikanten Merkmal jedoch nicht ableitbar.

Uniformity

Die Uniformität ist eine Kennzahl für die Entropie der spektralen Energieverteilung und berechnet sich nach [184] zu:

$$Uniformity = - \sum_{f=0}^{f_s/2} \left(\frac{S(f, t)}{\sum_{f=0}^{f_s/2} S(f, t)} \right) \cdot \log \left(\frac{S(f, t)}{\sum_{f=0}^{f_s/2} S(f, t)} \right) \quad (5.43)$$

Es ist klar erkennbar, dass die Stücke mit der geringsten Uniformität, also auch einem eher schmalen Spektrum, trophotrope und im Gegenteil die mit der höchsten Uniformität ergotrope sind. Im mittleren Bereich gibt es allerdings zahlreiche Überschneidungen, vor allem ergotrope Klaviermusik und trophotrope Streichermusik überlagern sich. Trotzdem ist die Trennungsschärfe mit $\Lambda = 0,52$ recht solide.

Zusammenfassung Basismerkmale

Außer der Uniformity – in der globalen Rangordnung der Merkmale immerhin das 22. Beste – besticht kein Basis-Merkmal durch besondere Trennkraft. Somit erscheint es unmöglich, ohne weitere musikalische Kenntnisse nur durch eine statistische Auswertung von Zeit- und Frequenzsignal Hinweise auf eine blutdrucksenkende Wirkung der Musik zu bekommen.

5.2.1.7 Zusammenfassung Musikalische Merkmale

Insgesamt wurden aus den oben beschriebenen Verfahren über 400 Kennzahlen extrahiert, von denen sich 276 als signifikant im statistischen, in Abschnitt 4.2.2.2 definierten Sinne erwiesen haben. Von diesen haben wiederum 169 eine Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 0,1 Prozent.

	Psy.-Ak.	Dyn.	Rhy.	Harm.	Basism.
Top 10	0	2	4	4	0
Top 20	0	7	7	6	0
Top 30	0	13	8	8	1
Top 40	0	21	9	9	1
Top 50	0	27	10	12	1

Tab. 5.4: Die besten Merkmalen und ihre Kategorie

In Tabelle 5.4 ist dargestellt, wie viele der besten zehn, zwanzig, dreißig ... Merkmale zu welcher Kategorie gehören. Harmonische, dynamische und Rhythmus-basierte Merkmale schneiden dabei gleichermaßen gut ab. Das scheinbare Übergewicht der

dynamischen Merkmale hängt vor allem mit den vielen guten $\Delta MFCC$ -Merkmalen zusammen. Einzig die relativ einfach zu berechnenden psychoakustischen und Basismerkmale kommen bis auf eine Ausnahme nicht vor.

Das erklärt die mangelnden Ergebnisse bei der manuellen Auswertung der Spektrogramme in einigen Vorarbeiten (siehe Abschnitt 4.2.2.1). Denn obwohl einige der besten Merkmale auf erstaunlich einfache Art berechnet werden können, stammen diese doch fast immer aus komplexeren Modellen – und sind nur in den seltensten Fällen direkt aus Zeit- oder Frequenzsignal ablesbar.

Die Ergebnisse dieser Merkmalsextraktion bestätigen insgesamt auch Decker-Voigts Aussagen über ergotrope und trophotrope Musik aus Kapitel 4.2. Alle seine Kriterien – vom Tongeschlecht abgesehen – sind relevant und es lassen sich für alle Bereiche aussagekräftige Merkmale finden.

Im nächsten Kapitel wird es nun darum gehen, diese Merkmale sinnvoll zu kombinieren, um daraus eine robuste Aussage über die Wirkung der analysierten Musikstücke treffen zu können.

5.2.2 Klassifikator

Im letzten Kapitel wurde beschrieben, wie eine Vielzahl verschiedener Merkmale aus den Musikstücken extrahiert werden kann. Jedes dieser Merkmale lässt sich als stochastische Variable betrachten und als Wahrscheinlichkeitsverteilung beschreiben, etwa durch ihren Mittelwert und ihre Standardabweichung. Wie schon in Kapitel 4.2.2.2 erläutert, reicht eine Klassifizierungsregel für ein einzelnes Merkmal normalerweise nicht zur Klassifizierung der gesamten Auswahl, da die Mittelwerte beider Klassen zu nahe am gemeinsamen Mittelpunkt liegen. Je mehr Merkmale mit einbezogen werden, desto besser wird tendenziell das Ergebnis (siehe Abbildung 4.8). Die Aufgabe dieses Kapitels ist also, aus den rund 300 statistisch signifikanten Merkmalen ein Regelwerk für die Zuordnung zu den beiden Klassen zu erstellen. Dieses Regelwerk heißt Klassifikator.

Klassifikatoren können auf sehr unterschiedliche Art funktionieren und trainiert werden. Zunächst wird ein passender Klassifikations-Algorithmus ausgewählt und anschließend daraus ein effektiver Klassifikator für blutdrucksenkende Musik entwickelt. In Abbildung 5.19 ist der Ablauf des gesamten Verfahrens schematisch dargestellt; Inhalte dieses Kapitels sind dabei grau hinterlegt.

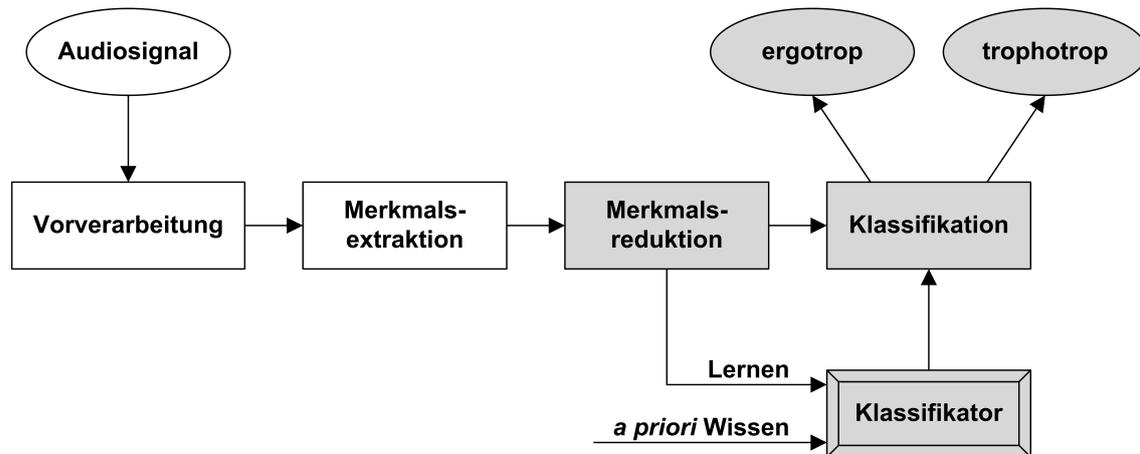


Abb. 5.19: Schema Merkmalsextraktion und Klassifizierung

5.2.2.1 Klassifikationsverfahren

Wie bei fast allen Klassifizierungen, kommt hier ein Top-down-Verfahren zum Einsatz: Zunächst wurden die beiden Zielklassen „ergotrop“ und „trophotrop“ vorgegeben. Im nächsten Schritt müssen nun die Merkmale ausgewählt werden, die in die Klassifizierung einfließen sollen, bevor schließlich der Klassifikator mit der Stichprobe trainiert wird und damit die Klassengrenzen zieht.

Mathematisch betrachtet lässt sich die Grundgesamtheit aller Musikstücke in zwei disjunkte Teilgesamtheiten, die ergotrope und die trophotrope Klasse \mathcal{K}_1 und \mathcal{K}_2 unterteilen.

Da als Ziel nicht eine diskrete Klassenzuteilung, sondern vielmehr eine qualitative Analyse in der Art der Fuzzy-Logik steht – also die Frage, wie gut das Musikstück zu den beiden Teilgesamtheiten passt –, ist eine dritte Klasse, zu der ein Musikstück das weder eindeutig trophotrop noch ergotrop wirkt zugeordnet würde, nicht notwendig und wird aus Komplexitätsgründen weggelassen. In diesem Fall würde die qualitative Aussage einfach lauten, dass jenes Musikstück zu gleichen Teilen ergotrop und trophotrop wirkt.

Den Teilgesamtheiten werden nun durch die Klassifizierungsfunktion $f(\vec{x})$ Bereiche im Merkmalsraum zugeordnet, die von einer Hyperfläche der Dimension $d - 1$ getrennt werden, der Merkmalsraum wird also durch

$$f(\vec{x}) : R^d \Rightarrow \mathcal{K} \quad \text{mit } \mathcal{K} = 1, 2 \quad (5.44)$$

auf die Klassen abgebildet.

Überanpassung und Merkmalsreduktion

Mit steigender Dimension d des Merkmalsvektors steigt tendenziell auch der Erfolg der Diskriminierung, solange mit jedem signifikanten Merkmal die informationstechnische Unsicherheit weiter abnimmt.

Dafür steigt die Gefahr, dass der Klassifikator an die Trainingsstichprobe überangepasst wird. Der Klassifikationsfehler wird zwar für die Stichprobe minimiert und täuscht ein gutes Ergebnis vor – die Übertragbarkeit auf die Grundgesamtheit ist jedoch nicht mehr gegeben. Unbekannte Musikstücke würden also nur noch dann sicher korrekt klassifiziert, wenn sie der Trainingsgruppe sehr ähnlich sind.

Das eigentliche Ziel des hier entwickelten Klassifikators ist es nicht, die Stichprobe möglichst gut zu teilen, sondern eine Aussage über unbekannte Musikstücke zu treffen. Insofern ist es sehr wichtig, mit den für die Klassifikation herangezogenen Merkmalen eine gute Balance zu erreichen, dass einerseits eine effektive Trennung erfolgen kann, andererseits die Anpassung an die Stichprobe aber möglichst gering ist und nur die den musikalischen Klassen ursächlich zugrunde liegenden Eigenschaften die Trennung bewirken. Die mögliche Anzahl an Variablen hängt dabei direkt vom Umfang der Stichprobe ab.

Je nach Klassifikationsverfahren muss die Menge an verwendeten Merkmalen noch weiter, teilweise nur auf zehn bis zwanzig, reduziert werden. Damit diese möglichst bedeutsam und repräsentativ für die musikalischen Unterschiede der beiden Klassen sind, werden sie nach statistischen, wie auch nach sachlogischen Gesichtspunkten ausgewählt. Genaueres zum Vorgehen ist im Abschnitt 5.2.2.3 beschrieben.

Beurteilung des Klassifikationserfolges

Definitionsgemäß gibt es keine fehlerfreie Klassifikation: Keine von Menschen manuell erstellte und erst recht keine automatische. Die Qualität hängt vor allem von drei Parametern,

- der Qualität der Stichprobe
- der Qualität der extrahierten Merkmale sowie

- dem Klassifizierungsprozess

ab. Letzterer ist lediglich ein Rad im Getriebe. Ist die Stichprobe verfälscht oder sind die Merkmale nicht aussagekräftig, um die differenten Eigenschaften der beiden Klassen herauszustellen, kann auch ein mächtiges Klassifikationsverfahren keine guten Ergebnisse mehr erzielen [161]. Umgekehrt bedeutet dies auch, dass bei einer hohen Qualität der Merkmale auch ein verhältnismäßig einfaches und effizientes Klassifikationsverfahren gute Dienste leisten kann.

Um verschiedene Klassifikationsverfahren überhaupt voneinander unterscheiden zu können, bedarf es festgelegter Qualitätskriterien. Das übliche Verfahren, den aus der Stichprobe entwickelten Klassifikator an einer größeren Stichprobe oder der Grundgesamtheit zu testen, ist hier nicht anwendbar, da gar nicht mehr als die in der Stichprobe enthaltenen je 34 ergotropen und trophotropen Musikstücke bekannt sind.

Die Stichprobe in eine Trainings- und eine Testsequenz aufzuteilen hilft auch nur bedingt, denn jede Verkleinerung der Trainingsmenge hat – wie oben erläutert – direkte Auswirkungen auf die mögliche Anzahl an Merkmalen und damit auf die Qualität des Klassifikators.

Deshalb wird in dieser Arbeit als erstes Qualitätskriterium ein zu 100 Prozent bestandener Kreuzvalidierungstest mit einer Fallauslassung (Leaving-one-out-Methode) verlangt. Dabei wird der Klassifikator mit allen Musikstücken der Stichprobe, außer einem einzigen, trainiert und anschließend getestet, ob das verbleibende Musikstück auf dieser Basis noch korrekt zugeordnet werden kann. Diese Aufgabe ist für alle 68 Stücke zu erfüllen.

Würde ein Musikstück hier falsch klassifiziert, ist das ein starkes Indiz für ein überangepasstes oder schlecht trennendes Klassifikationsverfahren.

Neben dieser notwendigen Bedingung ist bei allen Klassifikatoren, die den Merkmalsraum an einer Grenzfläche trennen, aus deren relativer Lage zu den Merkmalsvektoren \vec{x}_1 bis \vec{x}_n ein *echtes* Qualitätskriterium ableitbar.

Die meisten Klassifikationsverfahren geben auf die ein oder andere Weise die Abstände zur Klassengrenze aus. Wenn man nun die beiden Verteilungen der ergotropen und trophotropen Musikstücke als Normalverteilungen interpretiert und sie auf eine Standardabweichung von eins normiert, gibt der Abstand beider Mittelwerte die Effektivität des Klassifikators an. Je größer er ist, desto besser wurde die Stichprobe getrennt.

Abbildung 5.20 zeigt zwei normal verteilte Variablen mit der Standardabweichung

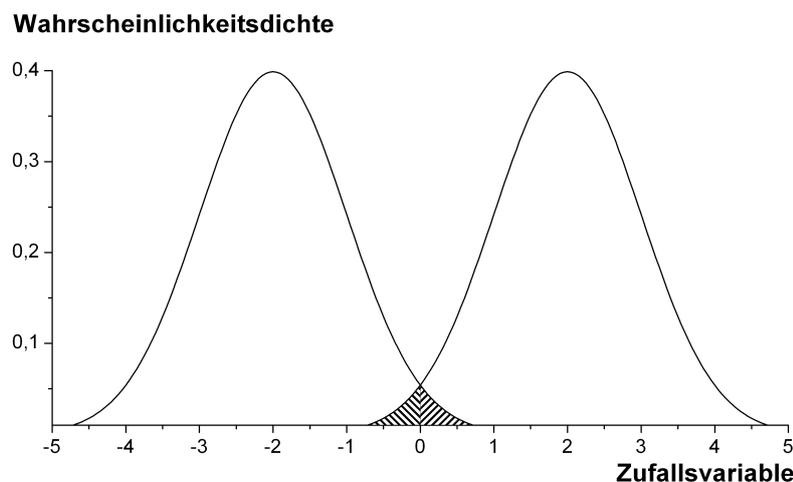


Abb. 5.20: Zwei normalverteilte Zufallsgrößen

$\sigma = 1$ und den Mittelwerten $\mu = \pm 2$. Bei Normalverteilungen liegen 95,4 Prozent der Werte im Intervall der zweifachen Standardabweichung $\mu \pm 2\sigma$. Die Hälfte der restlichen Werte (schraffiert), also je 2,3 Prozent der ergotropen und trophotropen Musikstücke werden in diesem Beispiel falsch klassifiziert.

Überblick über verschiedene Verfahren

Grundsätzlich kommen für unsere Problemstellung alle Verfahren in Frage, die auch in der Genreanalyse angewendet werden. Grob nach aufsteigender Komplexität geordnet wären das vor allem die Folgenden:

Entscheidungsbaum

Ein Entscheidungsbaum stellt ein hierarchisch organisiertes Regelwerk grafisch dar, wie es Abbildung 5.21a zeigt. Ausgehend von der Wurzel geht man an den Kanten (oder Ästen) entlang und trifft an jedem Knoten (oder jeder Gabelung) eine Entscheidung, welcher weiteren Kante zu folgen ist, bis ein Endknoten (oder Blatt) erreicht wird, der dann dem Resultat – also hier der geschätzten Klasse des Musikstücks – entspricht. Die große Stärke dieses Klassifikators ist die einfache und intuitive Darstellung der Entscheidungsregeln bei wenigen Hierarchieebenen. Bedingt durch die binären Entschei-

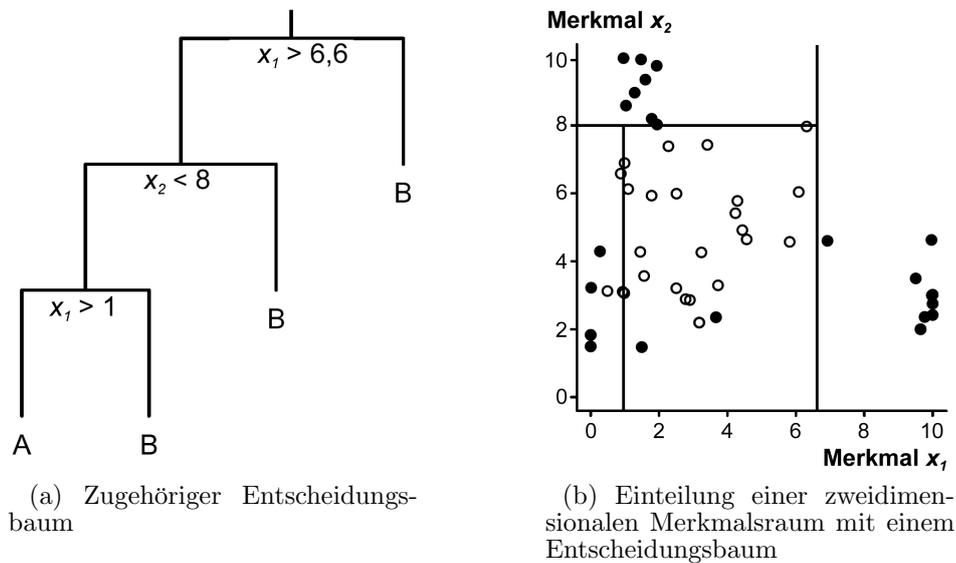


Abb. 5.21: Klassifizierung mit Entscheidungsbaum [167]

dungen in den Knoten²⁰ lassen sich Klassen allerdings nur für den in 5.21b gezeigten Fall gut trennen, wenn die Klassengrenze senkrecht zu den Hauptachsen der jeweiligen Merkmale steht. Je „schiefer“ die Grenze liegt, desto mehr muss der Merkmalsraum in unzählige kleine d -dimensionale Würfel zerlegt werden. Durch die vielen Hierarchieebenen geht der Vorteil der Übersichtlichkeit verloren, außerdem ist die Gefahr groß, dass der Entscheidungsbaum an die Trainingsmenge überangepasst ist und die größeren statistischen Zusammenhänge zwischen den Merkmalen nicht mehr erkennt.

Multiple Regressionsanalyse

Die Regression ist ein von Gauß entwickeltes Verfahren, das die Abhängigkeit zwischen Zufallsvariablen untersucht. Im Fall der einfachen linearen Regression werden dabei zwei Merkmale x und y untersucht, etwa Körpergröße und Gewicht. Aus einer Streuverteilung von mehreren Messungen wird mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate eine Residualgerade der Form

$$y = \alpha \cdot x + \beta \quad (5.45)$$

²⁰ Zum Beispiel: Wenn das Merkmal größer als der Schwellenwert ist, dann weiter auf dem linken Ast, ansonsten weiter auf dem rechten Ast.

bestimmt, die den Zusammenhang beider Variablen bestmöglich wiedergibt. Die Multiple Regression läuft analog dazu mit mehreren Variablen ab, die in unserem Fall auf eine Skala von ergotrop bis trophotrop abgebildet würde.

Voraussetzung für die Regressionsanalyse sind normalverteilte und unkorrelierte Zufallsvariablen mit einem Erwartungswert von null und einer gleichen Varianz. Für unsere Merkmale ist dies durch die in Abschnitt 4.2.2.2 erläuterte statistische Vorverarbeitung erfüllt. Damit die Regressionsgerade überhaupt schätzbar ist, muss die Anzahl an Variablen kleiner sein als die Größe der Stichprobe. Nach [21] sind nur signifikante Ergebnisse zu erzielen, wenn die Stichprobe die Menge an Variablen um mindestens das Dreifache, besser das Fünffache, übersteigt. In unserem Fall würde das bedeuten, dass nur rund sieben Merkmale zur Klassifizierung herangezogen werden können. Mit so wenigen Merkmalen ist es aber unmöglich, alle relevanten musikalischen Parameter abzudecken, so dass der Klassifikator lückenhaft wäre und schlechtere Ergebnisse erzielen würde.

Diskriminanzanalyse

Auch die (lineare) Diskriminanzanalyse teilt den Merkmalsraum linear in Klassen ein, verwendet dabei aber die Maximum-Likelihood-Methode, das heißt, sie optimiert die Wahrscheinlichkeit, dass ein Objekt zu einer bestimmten Klasse gehört. Zunächst muss eine Kosten- oder Verlustfunktion definiert werden, die beschreibt, welcher Schaden durch Fehlklassifikationen auftritt. So ist es in einer medizinischen Anwendung normalerweise viel risikoreicher einen kranken Patienten als gesund einzustufen, als einen gesunden irrtümlich als krank [167]. Des Weiteren muss die *a priori*-Verteilung bekannt sein – also die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der verschiedenen Klassen. So ist es beim obigen Beispiel meistens wesentlich wahrscheinlicher, dass man der Klasse „gesund“ angehört.

Ziel bei einem Zwei-Klassen-Problem ist es, für n Merkmale die Koeffizienten k_1 bis k_n zu finden und so den Merkmalsraum mit der Diskriminanzfunktion

$$f(\vec{x}) : y = \vec{k}^T \cdot \vec{x} + c \Rightarrow \mathcal{K} \tag{5.46}$$

auf die eindimensionale Variable \mathcal{K} abzubilden. Diese sagt aus, ob und wie sehr das analysierte Objekt zur einen Klasse (negative Werte) oder zur anderen (positive Werte) gehört, und soll beide Klassen optimal voneinander trennen. Optimal heißt, dass der

Abstand zwischen den beiden Klassen maximal und der innerhalb der Klassen minimal wird. Geometrisch interpretiert, findet die Diskriminanzfunktion die zur Trennung der beiden Klassen am besten geeignete Richtung im Merkmalsraum.

Wird als Maß für den Abstand zweier Klassen die Zwischengruppen-Kovarianzmatrix \mathbf{Z} und als Maß für die Streubreite jeder Klasse die Innergruppen-Kovarianzmatrix \mathbf{I} gewählt, so erhält man das Diskriminanzkriterium

$$\lambda = \frac{\vec{k}^T \cdot \mathbf{Z} \cdot \vec{k}}{\vec{k}^T \cdot \mathbf{I} \cdot \vec{k}}, \quad (5.47)$$

das zu maximieren ist [107]. Über die Ableitung nach \vec{k} entsteht das Eigenwertproblem

$$(\mathbf{Z} - \lambda \cdot \mathbf{I}) \cdot \vec{k} = 0. \quad (5.48)$$

Ist \mathbf{I} invertierbar, lässt sich der Eigenwert und der Eigenvektor \vec{k} (also die gesuchten Koeffizienten) berechnen.

Voraussetzung dafür ist, dass die einzelnen Merkmale normalverteilt und unkorreliert vorliegen und die Varianz-Kovarianz-Matrizen in beiden Klassen identisch sind [82]. Werden diese Voraussetzungen verletzt und etwa korrelierte Variablen verwendet, kann es vorkommen, dass die Kovarianzmatrizen singular und damit nicht invertierbar sind. In der Realität werden die Voraussetzungen allerdings nahezu nie erfüllt, was immer zu Kompromissen führt, die sich unter Umständen negativ auf die Leistungsfähigkeit der Diskriminanzfunktion als Klassifikator auswirken können.

Die Diskriminanzfunktion liefert – unter der grundsätzlichen Annahme, dass die beiden Klassen sich mit einer Diskriminanzfunktion trennen lassen – gute und im Fall von normalverteilten Variablen optimale Ergebnisse [107]. Sie ist jedoch stark problemabhängig, da die Eingangsdaten diese ideale Voraussetzung in der Praxis nur unzureichend erfüllen.

Im Gegensatz zu den folgenden komplexeren Verfahren, hat die Diskriminanzanalyse den weiteren Vorteil, dass ihr Ergebnis, eine Linearkombination der gemessenen Merkmale, einfach und intuitiv nachvollziehbar ist.

Hidden-Markov-Modell

Hierbei handelt es sich um ein stochastisches Modell zur Analyse von sequenziellen Daten. Ursprünglich wurde es von Markov entwickelt, um Wortfolgen in Texten zu

analysieren und so auf die Wahrscheinlichkeit, dass ein Wort in einem bestimmten Kontext steht, zu schließen.

Das Hidden-Markov-Modell besteht dabei aus einem verborgenen Zufallsprozess in Form einer Markov-Kette – einem endlichen Automaten, dessen Zustände durch bestimmte Übergangswahrscheinlichkeiten gewechselt werden. Ein weiterer, unverdeckter Zufallsprozess berechnet abhängig von den aktuellen Zuständen ein Ausgangssignal. Unter der Annahme, dass die Eingangssignale durch einen natürlichen Prozess erzeugt wurden, versucht man das Markov-Modell diesem so nachzubilden, dass es vergleichbaren statistischen Gesetzmäßigkeiten folgt [61]. Da es sich beim Musizieren sicher um einen natürlichen Prozess handelt und die gespielten Noten in der Regel nicht zufällig, sondern exakt in ihren individuellen Kontext eingebettet sind, eignet sich das Hidden-Markov-Modell zur zeitlichen Analyse extrahierter Merkmale. In [99] wird allerdings die relativ lange Trainingsdauer von Markov-Modellen als mögliche Einschränkung genannt.

Gaussian Mixture Models

Bei Gaussian Mixture Models ist die Grundannahme im Gegensatz zum Markov-Modell, dass der zeitliche Verlauf der Merkmale keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielt [166]. Stattdessen werden die Daten als Mischung von Normalverteilungen betrachtet, wobei jeder tatsächliche Parameterverlauf durch verschieden gewichtete Normalverteilungen zusammengesetzt werden kann. Ziel ist es, eine Art „Clusteranalyse“ durchzuführen und die Häufungszentren zu finden, die für die einzelnen Klassen stehen [210]. Die Position dieser Zentren wird über die Maximum-Likelihood-Funktion mit recht aufwendigen Algorithmen bestimmt.

Letztendlich erhält man einen fließenden Übergang zwischen den beiden Zentren, kann also nicht nur die binäre Zugehörigkeit zu einer Klasse feststellen, sondern auch die qualitative.

Naiver Bayes-Klassifikator

Der *optimale* Bayes-Klassifikator optimiert tatsächlich die Wahrscheinlichkeit einer korrekten Klassifikation. Leider wird die dafür benötigte Menge an Trainingsdaten praktisch nie erreicht. Deshalb wird als Variante der *naive* Bayes-Klassifikator benutzt, der mit weniger Testdaten auskommt, dafür jedoch die vereinfachende Annahme trifft,

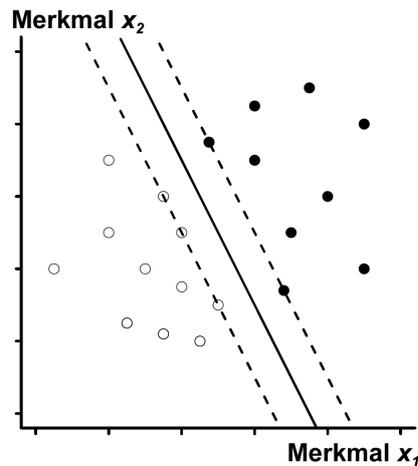


Abb. 5.22: Zweidimensionale Klassifizierung mit Support Vector Machine, die Objekte auf der gestrichelte Linie sind die Stützvektoren (nach [167])

dass die Merkmale eines Objektes für jede Klasse bedingt unabhängig sind [191]. Diese Annahme ist zwar fast immer falsch – trotzdem werden damit „sehr effektive“ Klassifizierungen erreicht [57].

Zunächst wird für jedes Merkmal die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass dieses in der Stichprobe zu einer der definierten Klassen führt, bestimmt. Wird der so trainierten Klassifikator nun auf andere Objekte der Grundgesamtheit angewandt, werden die Wahrscheinlichkeiten berechnet, mit der das analysierte Objekt jeder einzelnen Klasse zuzuordnen ist. Gewichtet man das Ergebnis schließlich mit den generellen Auftretenswahrscheinlichkeiten der Klasse (*a posteriori*-Wahrscheinlichkeit), ist das Ergebnis die Klasse, der die Zugehörigkeit am wahrscheinlichsten ist.

Support Vector Machine

Eine Support Vector Machine²¹ teilt den Merkmalsraum durch eine $(d-1)$ -dimensionale Hyperebene, wie Abbildung 5.22 zeigt. Aus der Vielzahl an möglichen Ebenen wird die gewählt, die auf allen Seiten den größten euklidischen Abstand zum nächstgelegenen Merkmalsvektor – den man dann Stützvektor nennt – hat.

Das funktioniert, wie in Abbildung 5.22 gezeigt, zunächst nur, wenn sich die Elemente beider Klassen nicht überlappen und die Klassengrenze linear verläuft. Um diesen

²¹ support vector (engl.): Stützvektor

Spezialfall zu verallgemeinern, wird der Merkmalsraum durch eine nicht-lineare Transformation in einen höherdimensionalen Raum – zum Beispiel in 10^{16} Dimensionen [107] – transformiert. Bei genügend hoher, notfalls unendlicher Dimension, ist die Stichprobe *immer* durch eine lineare Ebene teilbar. Bei der anschließenden Rücktransformation in den R^d entsteht allerdings im Allgemeinen eine gekrümmte und eventuell nicht mehr zusammenhängende Fläche.

Auch bei einer kleinen Stichprobe lassen sich mit einer Support Vector Machine sichere Klassifikationsergebnisse erzielen [107], besonders wenn spezielle Lernalgorithmen wie etwa „aktives Lernen“ zum Einsatz kommen [121]. Zudem lässt sich eine Überanpassung vermeiden, indem eine Kostenfunktion für Falschklassifizierungen definiert wird, die diese unter bestimmten Umständen zulässt. Der Nachteil ist, dass die Berechnungen während der Trainingsphase im hochdimensionalen Raum sehr rechenaufwändig sind und selbst mit mathematischen Tricks wie dem Einsatz von Kernel-funktionen immer noch länger dauern als bei vielen anderen Verfahren.

Trotzdem werden Support Vector Machines gerade in der Genre-Klassifizierung von Musik in den letzten Jahren verstärkt eingesetzt und vielfach als der stärkste Klassifikator betrachtet, etwa in [117] oder in [196], wo verschiedene Klassifikationsverfahren getestet wurden und die Support Vector Machine mit verschiedenen Kernen durchweg am Besten abgeschnitten hat.

Künstliche neuronale Netze

Neuronale Netze sind der Funktionalität der biologischen Gehirnfunktionen mit einer Vielzahl miteinander in Verbindung stehender Nervenzellen – also kleiner Prozessrechner, die verschiedene Eingangsstimuli in ein Ausgangssignal übersetzen – nachempfunden.

Beim Training werden die Verbindungen stärker gewichtet, die den Fehler des Ausgangssignals minimieren, während andere, die den Fehler des Gesamtnetzes erhöhen, geschwächt werden.

Bei einer hohen Neuronen-Anzahl sind künstliche neuronale Netze in der Lage, beliebig komplizierte Klassengrenzen anzunähern – allerdings liegt auch hier eine akute Überanpassungsgefahr. Trotz einer Vielzahl an Lern-Algorithmen ist es nicht einfach, die richtige Balance zwischen Trainingsdatenmenge und neuronalen Schichten zu fin-

den und zugleich zu vermeiden, dass das System in einem lokalen statt dem globalen Optimum endet.

5.2.2.2 Wahl eines passenden Klassifikators für blutdrucksenkende Musik

Die aufgeführten Klassifikationsmethoden lassen sich grob in zwei Arten teilen: Während Entscheidungsbäume, Regressions- und Diskriminanzanalysen relativ „einfache“ Verfahren sind, die sehr anschauliche Ergebnisse produzieren und notfalls noch per Hand berechnet werden könnten, basieren alle anderen Verfahren auf komplexen mathematischen Modellen, und können nur mit Hilfe von speziellen Software-Lösungen implementiert werden. Hier existiert aber für alle angeführten Modelle eine vielfältige Auswahl an freier Software.

Innerhalb dieser beiden Gruppen fällt die Auswahl nicht schwer. Bei den einfacheren Verfahren ist die Diskriminanzanalyse für die gegebene Problemstellung klar das überlegene System. Bei den komplexen Verfahren hat hingegen die Support Vector Machine bei den meisten Vergleichstests mit anderen Verfahren (siehe Abschnitt 5.2.2.1) besser oder vergleichbar gut abgeschnitten. Außerdem ist sie bei entsprechender Konfiguration relativ immun gegen eine Überanpassung.

Um zwischen den beiden Verfahren eine Entscheidung zu treffen, wurden Testklassifikationen mit beiden Methoden erstellt. Die Diskriminanzanalyse lässt sich mit der kommerziellen Statistiksoftware SPSS²² recht komfortabel lösen, für die Support Vector Machine wurde mit der freien Software Rapidminer [137] der Standard-Typ C-SVC mit einem RBF-Kernel realisiert.

Da die Grundgesamtheit in diesem Projekt nicht ausreichend groß ist, dass die Klassifikatoren an weiteren Testdaten validiert werden können, ist ein quantitativer Vergleich dieser beiden sehr unterschiedlichen Verfahren kaum möglich und alle Bewertungen nur subjektiv-qualitativer Art und damit mit Vorsicht zu interpretieren.

Nach allen Tests konnte jedoch keines von beiden Verfahren einen entscheidenden Vorsprung verbuchen und mit beiden sind gute bis sehr gute Trennungen der beiden Klassen möglich. Die ursprüngliche Vermutung, dass die Support Vector Machine bessere Ergebnisse liefern würde, konnte nicht bestätigt werden. Wahrscheinlich kommen

²² SPSS 16.0 von SPSS Software GmbH, München

die erweiterten Möglichkeiten dieses mächtigen Klassifikationsverfahrens erst bei viel schlechteren Merkmalen oder größeren Trainingsmengen zum Tragen, wenn die Diskriminanzanalyse die Daten systembedingt nicht mehr linear trennen kann. Mit den hier vorhandenen je 34 Trainingsdatensätzen pro Klasse handelt es sich doch um eine im Vergleich sehr kleine Menge. Für einen wirklich belastbaren Vergleich sind eine deutlich größere Trainingsmenge und dazu noch ausreichend Testdaten erforderlich. Dann könnten die üblichen Kenngrößen²³ ermittelt werden und ein harter Vergleich über die Richtig-Klassifizierungsrate wäre möglich.

Auf der Basis des Klassifizierungsergebnisse lässt sich also keine Entscheidung für ein Verfahren treffen – auch wenn die Support Vector Machine grundsätzlich größeres Potential hat, da sie im R^d auch eine nicht-lineare Trennung erlaubt. Auf der anderen Seite sprechen jedoch einige sekundäre Faktoren für die Diskriminanzanalyse:

- So erlaubt die gewichtete Diskriminanzfunktion eine anschauliche Darstellung der Ergebnisse, die sofort den Einfluss einzelner Merkmale auf das Klassifizierungsergebnis sichtbar macht.
- Die Ausgangsgröße der Diskriminanzfunktion ist eine Kennzahl, deren Vorzeichen die Klasse angibt. Gleichzeitig erlaubt sie auch eine qualitative Bewertung, ob das analysierte Objekt nahe an der Klassengrenze oder stark im ergotropen oder trophotropen Bereich liegt. Diese Eigenschaft macht auch eine zeitaufgelöste Betrachtung (siehe Abschnitt 5.2.2.4) auf einfache Weise möglich.
- Und schließlich ist das Klassifizierungs-Verfahren – nach einmaliger Aufstellung der Diskriminanzfunktion aus der Trainingsmenge – so einfach, dass es zusammen mit der Merkmalsextraktion in MATLAB implementiert werden kann. Beide Verfahren sind damit anwenderfreundlich in einen Gesamtprozess eingebunden.

Deshalb wurde eine Entscheidung zugunsten der Diskriminanzanalyse getroffen. Sie ist für die Aufgabe, auf Basis der hier vorhandenen Musikstücke, blutdrucksenkende Musik zu klassifizieren und qualitativ zu bewerten, auf jeden Fall gut geeignet.

²³ Sensitivität, Spezifität, Relevanz und Segreganz

5.2.2.3 Die Diskriminanzanalyse als Klassifikator

In diesem Abschnitt wird der Klassifikator für blutdrucksenkende und nicht-blutdrucksenkende Musik hergeleitet. Zunächst müssen die Variablen bestimmt werden, die in das Klassifikationsmodell einfließen sollen, und die grundsätzlichen Rahmenbedingungen für die Diskriminanzanalyse gesetzt werden. Anschließend wird eine optimale Diskriminanzfunktion entwickelt und deren Ergebnisse dargestellt und interpretiert.

Anzahl und Auswahl der Merkmale

Bevor der Klassifikator selbst entwickelt wird, muss entschieden werden, welche der Merkmale in ihn einfließen sollen. Man könnte vermuten, dass der Klassifikator besser wird, je mehr Merkmale einbezogen werden. Das stimmt zwar im Bezug auf die Stichprobe – tatsächlich wird der Klassifikator, wie in Abschnitt 5.2.2.1 beschrieben, durch Überanpassung immer schlechter. Es lässt sich zeigen, dass die Fehlerrate ab einer bestimmten (vom Umfang der Stichprobe und der Varianz der Grundgesamtheit abhängigen) Anzahl an Merkmalen wieder zunimmt [192].

Die optimale Variablenzahl zu finden, ist ein nicht triviales Problem, da sich dafür keine Formeln oder „Faustregeln“ in der Literatur finden lassen. Friedman [65] machte umfangreiche Klassifikations-Studien mit in Varianz und Umfang unterschiedlichen Stichproben. Daraus lässt sich ableiten, dass der Klassifikationsfehler für die hier vorhandenen Daten vertretbar klein bleibt, wenn die Anzahl an Merkmalen den halben Stichprobenumfang jeder Klasse nicht übersteigt. Somit wären 17 Merkmale ein geeigneter Umfang.

Nachdem die Anzahl feststeht, muss entschieden werden, welche der Merkmale einbezogen werden sollen. Der Weg einfach die 17 Merkmale mit dem besten Wilks'schen Lambda zu wählen, ist aus zwei Gründen nicht sinnvoll: Zum einen soll auch die verringerte Merkmalsmenge repräsentativ für die musikalischen Eigenschaften blutdrucksenkender Musik stehen. Auch wenn unter den besten viele harmonische Merkmale sind, ist das längst nicht der einzige Aspekt, der diese Klasse charakterisiert. Deshalb sollen harmonische, rhythmische und dynamische Merkmale in einem geeigneten Verhältnis in der Klassifizierung repräsentiert sein.

Zum anderen ist es völlig irrelevant, wie hoch die Trennkraft eines Merkmals für sich

allein ist – wichtig ist, welcher Gewinn für die zur Klassifizierung benötigte Information durch ein weiteres Merkmal insgesamt erzielt werden kann.

So kann es leicht passieren, dass ein Merkmal zwar für sich eine geringere Trennkraft hat, dafür aber weniger mit den vorhandenen Merkmalen korreliert ist und somit die Unsicherheit des Klassifikators am besten verringert.

Die Aufgabe, geeignete Merkmale zu finden, kann allerdings nicht analytisch gelöst werden; es lässt sich lediglich durch Ausprobieren ein – möglicherweise nicht globales – Optimum finden. Dafür gibt es in SPSS einige schrittweise Algorithmen, die mit ein paar zu setzenden Rahmenbedingungen bei jedem Schritt einen neuen Vorschlag machen, welche Variable aufgenommen werden soll beziehungsweise welche wieder aus der Klassifikation eliminiert werden kann.

In dieser Arbeit wurde der sogenannte F-Test durchgeführt: In jedem Schritt wird für jedes noch nicht verwendete Merkmal berechnet, wie groß der Gewinn bei der Modellerklärung in Relation zum Verlust eines Freiheitsgrades durch die zusätzliche Variable ist. Dabei gibt es *kritische Werte* der F-Statistik, die überschritten werden müssen, wenn der Zuwachs an Modellerklärung signifikant sein soll. Nach der Einbeziehung eines neuen Merkmals, wird für jede schon im Modell vorhandene Variable geprüft, ob diese Bedingungen für sie immer noch gelten. Ansonsten kann sie eliminiert werden.

In Tabelle 5.6 ist dieser Prozess für den hier entwickelten Klassifikator aufgeführt. Nach 33 Schritten wurden 25 Variablen hinzugefügt und 8 wieder eliminiert, so dass die Zielgröße von 17 Variablen erreicht wurde. Weiter ist das Wilks'sche Lambda der jeweiligen Diskriminanzfunktion in jedem Schritt als Maß für die Trennkraft des Klassifikators dargestellt. Im ersten Schritt mit nur einer Variablen beträgt es genau 0,269 – dem Wert des besten Merkmals *Spectral_Flatness2*, mit dem der Iterationsprozess beginnt. Nach der 33. Iteration wurde ein Zielwert von $\Lambda = 0,051$ erreicht.

Rahmenbedingungen und Annahmen

Für die Diskriminanzanalyse sind vorab zwei wichtige Rahmenbedingungen für die Grundgesamtheit zu setzen: Zum einen muss eine Kosten- oder Verlustfunktion definiert werden, die den Schaden durch eine Fehlklassifikationen angibt. Hier wurde entschieden, dass der Fehlklassifikation von trophotroper wie ergotroper Musik zunächst ein gleich großer Schaden beizumessen ist, beide Klassen also gleichberechtigt sind.

Iteration	Aufgenommen/Entfernt	Anzahl	Wilks' Λ
1	+ Spectral_Flatness2	1	0,269
2	+ Spectral_Flux_Max	2	0,179
3	+ std_FP_fluctsumMax	3	0,142
4	+ MFCC_DeltaDelta3	4	0,126
5	+ max_FP_fluctsumMax	5	0,119
6	+ Spectral_Flatness2_Max	6	0,112
7	+ Spectral_Bandwidth	7	0,105
8	+ mean_PH_focus	8	0,101
9	+ Spectral_Crest_Factor1_Min	9	0,098
10	+ Spectral_Flatness3_Max	10	0,094
11	+ Spectral_Flatness4	11	0,089
12	+ Spectral_Flatness5	12	0,086
13	+ FP_medfocus	13	0,084
14	+ mean_onsetenv_mean	14	0,081
15	+ Sonanz_Max	15	0,077
16	+ max_onsetenv_mean	16	0,074
17	+ FP_meanfocus	17	0,072
18	+ max_PH_sum	18	0,067
19	+ Delta_Spectrum_Magnitude_Max	19	0,064
20	– Spectral_Crest_Factor1_Min	18	0,065
21	+ Uniformity	19	0,063
22	+ Spectral_Crest_Factor3_Min	20	0,055
23	+ Spectral_Flux	21	0,053
24	– MFCC_DeltaDelta3	20	0,053
25	– Spectral_Flatness5	19	0,054
26	– Delta_Spectrum_Magnitude_Max	18	0,055
27	+ onsetCount_mean	19	0,050
28	– max_onsetenv_mean	18	0,051
29	+ mean_sharp_peak	19	0,049
30	+ Spectral_Crest_Factor1	20	0,047
31	– Spectral_Flux_Max	19	0,048
32	– max_FP_fluctsumMax	18	0,049
33	– Spectral_Crest_Factor1	17	0,051

Tab. 5.6: Iterationen zur endgültigen Auswahl von 17 Merkmalen. Die letzte Spalte zeigt Wilks' Lambda einer auf dieser Merkmalsauswahl basierenden Diskriminanzfunktion.

Zum anderen muss die *a priori*-Verteilung bekannt sein, was aber nicht weiter schwierig ist, da die Grundgesamtheit genau aus 34 ergotropen und 34 trophotropen Musikstücken besteht – beide Klassen werden also auch hier gleichrangig behandelt.

Um die Diskriminanzanalyse anwenden zu können, müssen die unabhängigen Variablen – also die extrahierten Merkmale – um die jeweiligen Schwerpunkte ihrer Klasse normalverteilt sein. Diese Annahme trifft auf fast alle Merkmale in guter Näherung zu. Einzig bei einigen Auswertungen des zeitlichen Minimums gibt es Probleme: So existieren hier Merkmale, die bei allen trophotropen Stücken identisch null sind und nur einige positive Werte bei ergotropen Musikstücken aufweisen. Auch wenn deren mit dem Wilks'schen Lambda betrachtete Trennkraft in der Regel nicht schlecht ist, können sie nicht für die Diskriminanzanalyse verwendet werden, da die Normalverteilungsbedingung verletzt ist.

Eine weitere Voraussetzung ist die möglichst exakte Identität der Varianz-Kovarianz-Matrizen in beiden Klassen [82]. Das bedeutet, dass die Varianz eines Merkmals um den ergotropen und den trophotropen Schwerpunkt identisch sein soll. Diese Voraussetzung ist in der Praxis fast nie zu realisieren und auch hier trifft sie kaum zu. So sind viele der extrahierten Merkmale eher auf einer logarithmischen, als einer linearen Skala angeordnet, was eine metrisch gleiche Varianz bei nicht-identischen Schwerpunkten grundsätzlich nicht zulässt. SPSS bietet aber auch die Möglichkeit, eine variierte Berechnung der Diskriminanzfunktion mit gruppenspezifischen Kovarianzmatrizen durchzuführen.

Bestimmung der kanonischen Diskriminanzfunktion

Alle 17 einbezogenen Merkmale haben eine Irrtumswahrscheinlichkeit p von weniger als 0,05 Prozent, sind also sehr signifikant. Damit lässt sich mit SPSS über die in Abschnitt 5.2.2.1 leicht modifiziert und vereinfacht aufgeführten Rechenschritte die

sogenannte kanonische Diskriminanzfunktion

$$\begin{aligned}
 y(\vec{x}) &= \vec{k}^T \cdot \vec{x} + c \\
 &= k_1 \cdot x_1 + k_2 \cdot x_2 + \dots + k_{17} \cdot x_{17} + c \\
 &= -0,23 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Spectral_Bandwidth} + 5,710 \cdot \text{Uniformity} \\
 &\quad + 24,29 \cdot \text{Spectral_Flatness2} - 8,337 \cdot \text{Spectral_Flatness2_Max} \\
 &\quad + 17,81 \cdot \text{Spectral_Flatness3_Max} - 16,03 \cdot \text{Spectral_Flatness4} \\
 &\quad + 1,942 \cdot \text{Spectral_Crest_Factor3_Min} + 23,84 \cdot \text{Sonanz_Max} \\
 &\quad + 54,55 \cdot \text{Spectral_Flux} + 9,356 \cdot \text{mean_PH_focus} \\
 &\quad - 0,071 \cdot \text{max_PH_sum} + 0,112 \cdot \text{std_FP_fluctsumMax} \\
 &\quad + 32,99 \cdot \text{FP_medfocus} - 17,09 \cdot \text{FP_meanfocus} \\
 &\quad - 2,254 \cdot \text{mean_sharp_peak} - 1,019 \cdot \text{onsetCount_mean} \\
 &\quad + 0,86 \cdot 10^3 \cdot \text{mean_onsetenv_mean} - 90,64
 \end{aligned} \tag{5.49}$$

errechnen. Die Koeffizienten k_n beziehen sich dabei auf die nicht-normierten Merkmale. Damit die Diskriminanzfunktion in der praktischen Anwendung direkt in MATLAB berechnet werden kann, ohne vorweg eine aufwendige Transformation ausführen zu müssen. Die standardisierten kanonischen Koeffizienten sind in Tabelle 5.8 in absteigender Reihung gegeben. Sie sagen aus, wie groß die Gewichtungen der einzelnen Merkmale auf die Diskriminanzfunktion $y(\vec{x})$ sind. Auch wenn diese in ihrer Wertigkeit deutlich schwanken, gibt es doch kein Merkmal, das so unbedeutend wäre, dass es wieder aus der Funktion entfernt werden könnte.

Ergebnisse der Diskriminanzfunktion

Der hohe Eigenwert $\lambda = 18,43$ und das Wilks'schen Lambda $\Lambda = 0,051$ von $y(\vec{x})$ deuten auf eine gute Trennungswirkung der beiden Klassen hin. Tatsächlich haben der ergotrope und trophotrope Schwerpunkt der Diskriminanzfunktion bei einer Standardabweichung von etwa eins einen Abstand von 8,46!

In Abbildung 5.23 ist die Verteilung der Musikstücke über der Diskriminanzfunktion $y(\vec{x})$ aufgetragen. Die Tabelle in Anhang D stellt zusätzlich alle untersuchten Musikstücke nach dem Wert der Diskriminanzfunktion sortiert dar. Die trophotropen Musikstücke haben dabei negative Werte, die ergotropen positive. Betrachtet man die

Merkmal	Gewicht
Uniformity	2,292
Spectral_Flux	2,093
Spectral_Flatness2	1,862
FP_medfocus	1,682
Spectral_Crest_Factor3_Min	1,652
Spectral_Flatness4	-1,626
Sonanz_Max	1,535
Spectral_Flatness3_Max	1,533
mean_onsetenv_mean	1,218
std_FP_fluctsumMax	1,186
Spectral_Bandwidth	-1,082
FP_meanfocus	-0,819
onsetCount_mean	-0,789
Spectral_Flatness2_Max	-0,766
max_PH_sum	-0,718
mean_sharp_peak	-0,674
mean_PH_focus	0,565

Tab. 5.8: Die ermittelten 17 Merkmale der Diskriminanzfunktion und ihr Gewicht für die Einteilung in trophotrope und ergotrope Wirkung der therapeutisch eingesetzten Musikstücke.

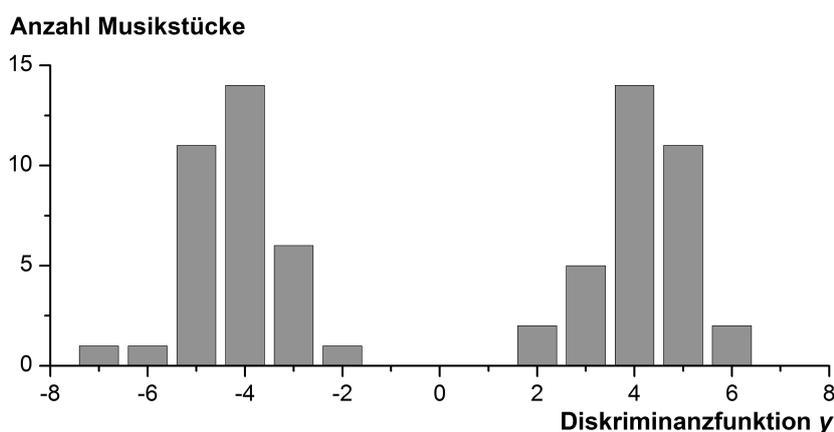


Abb. 5.23: Verteilung der ergotropen (positiver Bereich) und trophotropen Musikstücke (negativer Bereich) auf der Diskriminanzachse

beiden Verteilungen um den ergotropen und trophotropen Schwerpunkt als normalverteilt, so liegt die Wahrscheinlichkeit, dass ein trophotropes Musikstück in Abstand der vierfachen Standardabweichung liegt, bei 99,997 Prozent. Die Wahrscheinlichkeit, dass es richtig, also im negativen Bereich klassifiziert wird, liegt somit bei 99,9985. – Diese Fehlerabschätzung ist jedoch nach einer Reklassifikations-Methode erfolgt, das heißt, dass die Testdaten in den Trainingsdaten enthalten sind und keine zum Zeitpunkt der Klassifikationsentwicklung unbekannt Information klassifiziert werden muss. Nach [192] liefert diese Methode zu optimistische Resultate und die zu erwartende Fehlerrate wird unterschätzt.

Aussagekräftiger ist der in Abschnitt 5.2.2.1 besprochene Kreuzvalidierungstest mit einer Fallauslassung (Leaving-one-out-Methode). Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.10 dargestellt: Er funktioniert zu 100 Prozent! Das bedeutet, alle Musikstücke konnten auch ohne in der Trainingmenge enthalten zu sein, korrekt eingeordnet werden. Bei 67 Musikstücken lag die Wahrscheinlichkeit, der falschen Klasse zugeordnet zu werden, bei unter 0,05 Prozent; nur ein Stück, Pachelbels Kanon, hatte mit 0,3 Prozent eine etwas höhere Falschklassifikations-Wahrscheinlichkeit. Auch in Abbildung 5.23 ist dieses Stück mit $y = -1,53$ (beim Wert $y(\vec{x}) = -2$ eingruppiert) das mit Abstand am unschärfsten aller 34 der trophotropen Gruppe zugeordneten Musikstücke. Die Ursache dafür wird bei einer zeitaufgelösten Betrachtung deutlich und ist in Abschnitt 5.2.2.4 diskutiert.

	Ursprüngl. Gruppe	Vorhergesagte Gruppe		
		ergotrop	trophotrop	gesamt
Anzahl	ergotrop	34	0	34
	trophotrop	0	34	34
Prozent	ergotrop	100 %	0	100 %
	trophotrop	0	100 %	100 %

Tab. 5.10: Ergebnisse des Kreuzvalidierungstests mit einer Fallauslassung (Leaving-one-out-Methode)

Trotz dieser kleinen Einschränkung wird auch dieser Test vom Klassifikator sehr gut bestanden. Nach [192] ist diese Testmethode konservativ und überschätzt die zu erwartende Fehlerrate eher.

Damit ist nicht nur erwiesen, dass der hier entwickelte Klassifikator eine hohe Trennkraft aufweist, sondern auch das Nichtvorhandensein einer Spezifität bezüglich der Trainingsgruppe und die Robustheit für die Anwendung auf eine erweiterte Grundgesamtheit sind gezeigt.

5.2.2.4 Zeitaufgelöste Bewertung der Musikstücke

Ziel der vorliegenden Arbeit war ja nicht nur, unbekannte Musikstücke binär in blutdrucksenkende und nicht-blutdrucksenkende zu klassifizieren, sondern möglichst auch eine qualitative Aussage zu treffen, wie sehr ein Musikstück einer Klasse angehört. Über die Diskriminanzfunktion $y(\vec{x})$ ist das denkbar einfach, denn ihr Wert ist metrisch um den Nullpunkt skaliert: Je negativer $y(\vec{x})$ wird, desto mehr gehört ein Musikstück zur Gruppe der 34 trophotropen Stücke aus der Trainingsgruppe und umgekehrt.

Da diese Qualifikation auf die einzelnen Musikstücke bezogen gut funktioniert, stellt sich die Frage, ob sie auch zeitaufgelöst vorgenommen werden kann. Das ist zum einen wichtig, weil die meisten Musikstücke nicht stringent tropho- oder ergotrop wirken sondern oftmals – schon aus Gründen der musikalischen Spannung – gemischt. Nahezu alle klassischen Formschemata bestehen aus einer dreigliedrigen Form, bei der der mittlere Teil in Dynamik, Charakter und oft auch der Tonart kontrastiert. Auch neuzeitlichere Musikstücke, die nicht mehr nach einem formalen Schema komponiert sind, verwenden diese Dramaturgie oft implizit. So kann es vorkommen, dass ein Musikstück zwar als insgesamt blutdrucksenkend eingeschätzt wird, einzelne Stellen aber möglicherweise indifferent oder sogar genau gegenteilig wirken und damit die Anwendbarkeit des Gesamtstücks im therapeutischen Umfeld fragwürdig erscheinen lassen. Mit einer zeitlich aufgelösten Qualifikation wäre es möglich, schlecht wirkende Stellen herauszuschneiden und nur optimal blutdrucksenkende Musik einzusetzen. Dieser Prozess kann noch weiter getrieben werden, indem aus den am besten funktionierenden Sequenzen Schleifen geschnitten werden, die in beliebigen Iterationen dem Patienten vorgespielt werden können.

Ein weiterer – praktischer – Aspekt, der eine zeitliche Qualifikation sinnvoll macht, ist die unter anderem in [123] erlangte Erkenntnis, dass die Patienten sich vor allem

Musikstücke einer Länge von etwa drei Minuten wünschen. Somit ist es bei längeren Musikstücken möglich, genau den Teil auszuwählen, der am wirkungsvollsten den Blutdruck senken kann.

Entwicklung der zeitaufgelösten Diskriminanzfunktion

Die Diskriminanzfunktion $y(\vec{x})$ gilt ebenso für Gesamtstücke wie für einzelne Passagen oder Zeitschritte. Problematisch sind nur einige der hinzugezogenen Merkmale: Während die Mehrzahl von vornherein ein Mittelwert von verschiedenen zeitlichen Einzelmessungen ist, handelt es sich bei den sechs Merkmalen `Spectral_Flatness2_Max`, `Spectral_Flatness3_Max`, `Spectral_Crest_Factor3_Min`, `Sonanz_Max`, `max_PH_sum` und `std_FP_fluctsumMax` um statistische Auswertungen der zeitlichen Verteilung über den gesamten Zeitverlauf wie etwa Standardabweichungen oder Maximalwerte. Diese lassen sich grundsätzlich nicht sinnvoll zeitaufgelöst darstellen. Deshalb werden diese sechs Variablen auch für die zeitaufgelöste Diskriminanzfunktion $y(\vec{x}(t))$ über das gesamte Stück berechnet und fließen zusammen mit dem Koeffizienten k_0 in den konstanten Teil von $y(\vec{x}(t))$ ein. Die verbleibenden elf Merkmale werden in Abschnitten zu zwei Sekunden, sechs Sekunden (einige dynamische Merkmale) und zwölf Sekunden (rhythmische Merkmale) berechnet.

Als Zeitauflösung der Diskriminanzfunktion werden zwei Sekunden gewählt. Merkmale, die seltener vorliegen, werden mit der Spline-Methode in ein zwei-Sekunden-Raster interpoliert.

Ergebnisse der zeitaufgelösten Diskriminanzfunktion

Die ersten Ergebnisse von $y(\vec{x}(t))$ sehen nicht sehr vielversprechend aus, da die einzelnen diskreten Messpunkte sehr schwanken. Die Ursache dafür ist in den alle zwei Sekunden berechneten harmonischen und dynamischen Merkmalen zu finden. Bei einem durchschnittlichen Grundschatz von 120 Schlägen pro Minute kommen auf jeden dieser Abschnitte genau vier Schläge. Ist das Tempo geringfügig langsamer, sind es auch immer wieder nur drei statt vier Schläge. Selbst bei absolut gleichmäßiger Dynamik variieren benachbarte Messwerte dadurch um bis zu einem Drittel und gleichen sich erst im Mittel wieder aus.

Ähnlich sieht es bei den harmonischen Merkmalen aus. Von Kapitel 5.2.1 ist bekannt,

dass trophotrope Stücke im Mittel relativ harmonisch klingen. Trotzdem gibt es natürlich auch Inharmonizitäten, die in der Regel aufgelöst und von einem sehr harmonischen Klang abgelöst werden. Typisches Beispiel hierfür sind der letzte und der vorletzte Akkord eines Musikstücks. Fallen diese auf zwei verschiedene Messpunkte, entstehen auch hier große Schwankungen.

Um eine sinnvolle zeitaufgelöste Betrachtung möglich zu machen, muss $y(\vec{x}(t))$ damit noch mit einem Tiefpass gefiltert werden, der die statistisch bedingten Schwankungen entfernt. Danach entsteht ein geglätteter Verlauf, wie er in Abbildung 5.24 beispielhaft gezeigt ist.

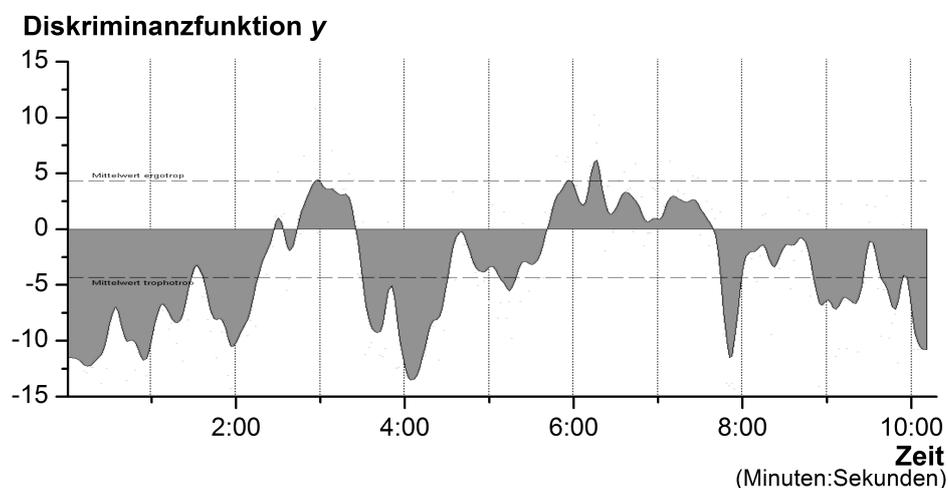


Abb. 5.24: Zeitaufgelöste Diskriminanzfunktion von Khachaturians Adagio von Spartacus und Phrygia aus Spartakus

Bei der Untersuchung aller trophotropen Musikstücke, zeigt sich, dass etwa die Hälfte – von kleinen Schwankungen abgesehen – konstant im klar negativen, trophotropen Bereich bleibt. Bei der anderen Hälfte, zu der auch der in Abbildung 5.24 gezeigte Verlauf von Khachaturians Spartakus gehört, schwankt die Diskriminanzfunktion allerdings stark über der Zeit. Diese Schwankungen lassen sich jedoch alle durch den Höreindruck verifizieren. So sind die beiden Passagen, bei denen $y(\vec{x}(t))$ in den ergotropen Bereich durchbricht, genau die, bei denen im Musikstück die Dramatik zunimmt und die von Decker-Voigt entwickelten Kriterien für trophotrope Musik (siehe Abschnitt 4.2) zumindest teilweise verletzt sind.

Mithilfe dieser zeitlichen Untersuchung kann auch die oben in Abschnitt 5.2.2.3 angesprochene Frage, warum Pachelbels Kanon D-Dur am „wenigsten“ zu den anderen trophotropen Musikstücken gehört, leicht beantwortet werden. Der in Abbildung 5.25 dargestellte zeitliche Verlauf und der Höreindruck zeigen gleichermaßen, dass die mittleren Wiederholungen des Kanons, wenn auch nicht direkt, die ergotropen Kriterien erfüllen, so doch die meisten der trophotropen verletzen. Erst zum Schluss, wo die schwebenden und wenig akzentuierten Steicherklänge in den Vordergrund rücken, überwiegt wieder der trophotrope Charakter.

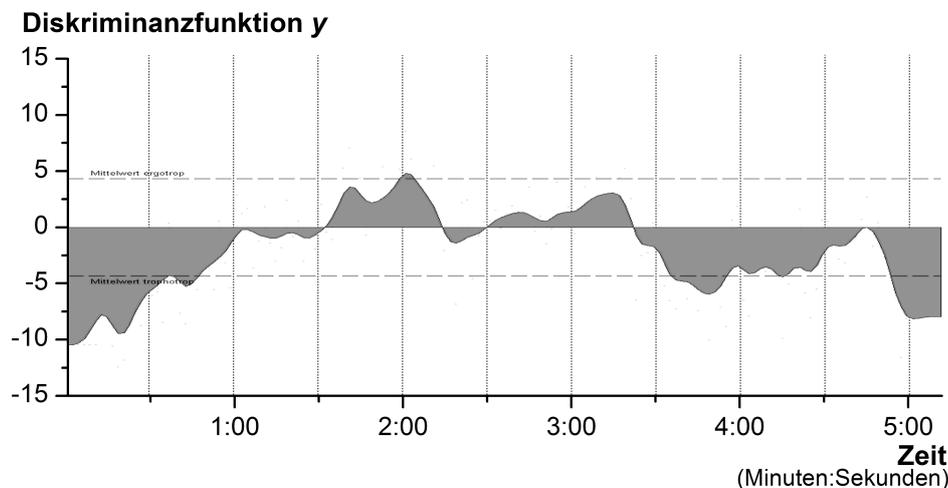


Abb. 5.25: Zeitaufgelöste Diskriminanzfunktion von Pachelbels Kanon aus Kanon und Gigue D-Dur

Insgesamt lässt sich sagen, dass die zeitaufgelöste, qualifizierende Diskriminanzfunktion $y(\vec{x}(t))$ durchweg plausible Ergebnisse liefert und damit gut als Grundlage zur Suche nach besonders blutdrucksenkenden Passagen geeignet ist.

5.2.3 „Überoptimale Sequenzen“

Die Generierung überoptimaler Interventionssequenzen sei hier exemplarisch an folgenden Sequenzen dargestellt. Es wurden drei Schleifen aus besonders gut wirkenden Passagen geschnitten, beziehungsweise aus sehr langen Musikstücken die am besten wirkende Phase extrahiert. Alle Schleifen sollen möglichst nah an die als optimal erachtete Länge von drei Minuten herankommen [123], um auch für einen späteren Therapieeinsatz herangezogen werden zu können. Gleichzeitig müssen die Schnittpunkte auch nach musikalischen Gesichtspunkten stimmig gewählt werden, denn abrupte Brüche

wirken beim Hören störend und würden den Patienten im ungünstigsten Fall aus einer parasympatischen Tonuslage werfen.

- **Solvejgs Lied von Grieg**

Hier wurde eine Version geschnitten, die die trophotrop wirkenden Strophen (Takt 10 bis 24 sowie 41 bis 55) als Schleife hintereinander folgen lässt und die als weniger trophotrop qualifizierten Zwischenspiele herauslässt.

- **Andante aus Mendelssohns 1. Klavierkonzert**

Hier wurde aus dem insgesamt fast sechs Minuten langen Stück eine musikalisch stimmige, verkürzte Version (Takt 10 bis 32, 64 bis 75 und 82 bis 90) hergestellt, die 3:06 Minuten lang ist.

- **Adagietto von Mahler**

Bei diesem Stück wurde die erste, sehr ruhige Passage verwendet.

Einige der besonders gut wirkenden Musikstücke, etwa Saint-Saens' „Schwan“ oder Mozarts „Ave verum“ haben schon die ideale Länge von etwa drei Minuten und bestehen nur aus trophotropen Passagen, so dass sie ohne Modifikation direkt in der Therapie eingesetzt werden können.

Viele zusätzliche Schleifen, auch als Loop bezeichnet, sind in weiteren Arbeiten entstanden und können bei Interesse im Archiv des Heinz Nixdorf-Lehrstuhls für Medizinische Elektronik eingesehen werden. **Eine Auswahl an positiv getesteten Hörbeispielen befindet sich auf der als Anlage beiliegenden DVD.**

Damit ist es im Rahmen dieser Arbeit gelungen, einen Satz von therapeutisch hochwirksamen Musikstücken nach rationalen Kriterien zusammenzustellen, die besonders in der Loopform für die Wiedergabe auf Medien geeignet ist, die nicht über besonders großen Speicherplatz verfügen. **Damit tritt eine gezielte bioakustische Musiktherapie in über 50 % der zu behandelnden Bluthochdruckpatienten als ernstzunehmende Alternative zur medikamentösen Therapie in Konkurrenz.**

Dies ist besonders unter dem Gesichtspunkt der möglichen Nebenwirkungen von blutdrucksenkenden Medikamenten von Bedeutung und es liegt aus systemischen Gründen der Verdacht nahe, dass die Ergebnisse ansatzweise auch auf die Asthmatherapie

übertragen werden können, da man auch hier von stark adrenergen Einflüssen ausgehen kann.

Da die Ergebnisse mithilfe des zuvor beschriebenen Virtual Lab in authentischer Umgebung ermittelt wurden kann davon ausgegangen werden, dass sich möglicherweise störende Umgebungseinflüsse neutralisiert haben.

Die akustisch nicht optimale Schnittstelle Ohr – Handykopfhörer lässt erwarten, dass bei optimalerer Auslegung (speziell adaptierbare Kopfhörer nach Wahl) noch bessere therapeutische Ergebnisse erzielt werden können. Ähnlich wie bei einem anderen am Lehrstuhl erfolgreich verfolgten Projekt, nämlich der Biofeedback-Therapie von Bruxismus [39], könnte man sich vorstellen, dass zur erleichternden nachhaltigen Therapie des Bluthochdrucks eine spezielle bluetoothgestützte Hörkanalplastik verwendet wird.

6 Zusammenfassung der Analysen und Ergebnisse

Die in Kapitel 5.1 aufgestellte Hypothese, dass das Virtual Lab als technische Gesundheitsplattform akzeptiert werde und eine musiktherapeutische Intervention die Blutdruckwerte nachhaltig senke, konnte bestätigt werden.

6.1 Eingesetzte Technik

Im Verlauf von 5 Jahren wurden Tausende von Einzelmessungen telemedizinisch mit den Messkits an die SynergyCare-Datenbank übertragen. Es gab keinen Ausfall der Datenbank und keine nennenswerten Probleme mit der Versendung der E-Mails über das Mobilfunknetz. Auch die Bluetooth-Übertragungen liefen im Wesentlichen stabil. Hier gab es am ehesten kleinere Ausfälle, die teilweise auf die beschränkte Lebensdauer heutiger elektronischer Geräte zurückzuführen ist.

Viele Patienten wünschen sich Oberarmmessgeräte, da sie es meist von ihrem Hausarzt gewohnt sind. Diese vermitteln auch, dass Oberarmgeräte besser seien als Handgelenksgeräte. In der Praxis hat sich diese Ansicht jedoch nicht bestätigt und ist abhängig von der Qualität des Gerätes. Für die durchgeführten Versuche waren die Resultate ausreichend, da nur die relativen Veränderungen des Blutdruckes im Zusammenhang mit den Untersuchungen von Interesse waren.

6.2 Akustische Wirkparameter

Mit dem entwickelten Klassifikator können nun beliebige vom Patienten gewünschte klassische Musikstücke erstmals auf ihre blutdrucksenkende Wirkung untersucht werden. Zudem ist es möglich aus Musikstücken, die insgesamt eine indifferente Wirkung

haben, speziell wirkende Passagen für die akustische Biofeedback-Therapie zu extrahieren. Dies gestattet eine optimale Modulation des Blutdruckes.

6.3 Medizinische Resultate

Es konnte gezeigt werden, dass die im Rahmen dieser Arbeit extrahierten akustischen Sequenzen und Klangstrukturen den Blutdruck signifikant senken können. Der Blutdruck der Probanden konnte im Mittel um -2,57 mmHg (systolisch) und -1,54 mmHg (diastolisch) bei einer Signifikanz von 1,3 % (systolisch) und 0,3 % (diastolisch) gesenkt werden. Dieses sehr gute Ergebnis ist durchaus vergleichbar mit medikamentösen Interventionen.

6.4 Akzeptanz, Therapietreue, Nutzerfreundlichkeit

Zur Evaluierung der Telemedizinplattform sollten die teilnehmenden Patienten einen vierseitigen Fragebogen (siehe Anhang A.2) ausfüllen, in dem sie ihre Erfahrungen schildern und die einzelnen Komponenten des Systems bewerten konnten. Die Auswertung der einzelnen Fragen erlaubt Rückschlüsse, inwiefern die Komponenten des Virtual Lab bereits ausreichend praxisgerecht konzipiert wurden.

Innerhalb des Fragebogens wurde den Patienten die Möglichkeit gegeben, ihre Eindrücke, aufgetretene Probleme oder Vorschläge für Verbesserungen niederzuschreiben. Bei anderen Fragen standen einige vorgegebene Auswahlmöglichkeiten, wie Noten, zur Verfügung. Da der Fragebogen etwas zeitversetzt ausgegeben wurde, existieren nicht von allen Patienten Rückläufer. Auf der anderen Seite konnten von einigen Patienten, deren Blutdruckdaten für eine sinnvolle Auswertung nicht geeignet waren, die Antworten verwendet werden.

Wie bereits erwähnt, gestaltete sich die Anwerbung freiwilliger und geeigneter Probanden als nicht einfach. Die Patienten sollten deshalb in der ersten Frage die Motivationsgründe erläutern, die sie zur Teilnahme an der Studie bewegten. Viele Teilnehmer gaben an aus Neugier oder technischem Interesse an dem Versuch teilgenommen zu haben. Daraus lässt sich schließen, dass ein Großteil der Bevölkerung an Neuentwicklungen interessiert und offen für neue Technologien im Gesundheitssystem ist, falls diese

Vorteile bieten. Im Falle der Musiktherapie wäre dies in erster Linie die Möglichkeit, auf oft mit Nebenwirkungen behaftete Medikamente verzichten zu können. Mehrere Patienten aus der Klinik Höhenried gaben an, auf Anregung des Klinikpersonals am Versuch teilgenommen zu haben. Hier zeigt sich, dass sich die Förderung der Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern der Klinik und die Optimierung der Abläufe auszahlt haben.

Auch wenn letztendlich nur die korrekte Auswertung der medizinischen Daten sinnvoll ist, sollten die Patienten auch ihre subjektiven Eindrücke wiedergeben, inwiefern die Musik Auswirkungen auf ihr allgemeines Wohlbefinden und ihren Blutdruck hatte. Die Meinungen der Patienten gingen dabei weit auseinander. So gaben viele Patienten an, keine direkten Auswirkungen bemerkt zu haben. Andere dagegen empfanden eine beruhigende Wirkung und eine Steigerung des allgemeinen Wohlbefindens.

Das Blutdruckmessgerät stellt eine wichtige Komponente der Telemedizinplattform dar. Mit dem Gerät muss mehrmals täglich der Blutdruck ermittelt werden. Aus diesem Grund ist eine effektive Handhabung essentiell. Das Messgerät sollte schnell angelegt und wieder abgenommen werden können und so einfach wie möglich zu bedienen sein. In der Studie kam ein Blutdruckmessgerät der Firma Omron zum Einsatz. Sofern man keine Einstellungen wie eine Neudefinition des Datums oder der Uhrzeit vornehmen muss, kann das Gerät von Omron mit nur einer Taste bedient werden. Die Übertragung der Blutdruckwerte zum Mobiltelefon erfolgt, wie bereits angesprochen, vollautomatisch. Zudem verfügt das Messgerät über einen Positions- bzw. Neigungssensor, der das Auffinden der optimalen Messposition in Höhe des Herzens erleichtert. Die Patienten sollten angeben, wie sehr sie mit dem Omron-Gerät zufrieden waren, und zusätzlich die Bedienbarkeit bewerten. Es konnten Noten zwischen 1 und 6 vergeben werden. In den Diagrammen 5.29 und 5.30 sind die Anzahl der gegebenen Antworten für beide Fragen abgebildet.

Das Gerät wurde durchgehend sehr positiv und fast ausschließlich mit Noten von 1 oder 2 bewertet. Die meisten Patienten waren demnach außerordentlich zufrieden mit dem Messgerät. Auch die Bedienbarkeit wurde von nahezu allen Patienten als sehr gut eingestuft.

Vielen Patienten haben die ausgewählten Musikstücke gut gefallen. Allerdings handelt es sich bei den Studienteilnehmern zufällig größtenteils um ältere Probanden, die möglicherweise eine höhere Affinität zur klassischen Musik besitzen. Inwiefern

dies zutrifft, wird in den nachfolgenden Fragen noch näher behandelt. Generell sollte die, in diesem Fall medizinische, Wirkung eines Musikstückes möglichst unabhängig von individuellen Geschmäckern sein. Falls eine Komposition einem Patienten jedoch überhaupt nicht gefällt, kann der dadurch erzeugte Stress den Blutdruck ansteigen lassen und den beabsichtigten Therapieeffekt zunichtemachen. Bei den aktuellen Stücken handelt es sich nicht mehr um die vollständige Komposition, sondern um speziell generierte Loops, die eine besonders hohe Wirkung auf den Blutdruck haben sollen.

Neben einer hohen Akzeptanz bei den Patienten müssen die Vorteile neuer Systeme und Therapieansätze gerade auch von den Ärzten anerkannt werden. Die Ärzte müssen in Zukunft selbstständig mit den Komponenten arbeiten und diese verwalten. Das medizinische Personal wäre auch dafür zuständig, die Patienten für eine derartige nicht medikamentöse Behandlung, wie die Bluthochdrucktherapie mit Musik, zu begeistern und diese zu betreuen. Aus den Gesprächen mit den in die Studie involvierten Ärzten kann generell ein positives Fazit gezogen werden. Im Gegensatz zu großen Teilen der Bevölkerung ist sich das medizinische Fachpersonal der Bedeutung von Bluthochdruck bewusst und kennt die negativen Folgen die auftreten können, falls die Hypertonie nicht adäquat behandelt wird.

Die meisten Ärzte scheinen sehr offen für neue Behandlungsmöglichkeiten in diesem Bereich zu sein und sehen auch die Vorzüge von nicht medikamentösen Therapieansätzen. Auch von der technischen Ausgereiftheit und Stabilität der Messkits waren die Ärzte positiv angetan. Wie das Resultat der Auswertung der Fragebögen zeigt, traten nur sehr vereinzelt technische Probleme auf. Die Patienten mussten in der Regel nur kurz in die Bedienung der Komponenten eingewiesen werden und kamen schnell damit zurecht. Die genannten Punkte erleichterten die Zusammenarbeit mit den Ärzten erheblich, da im Klinikalltag wenig Zeit besteht sich um derartige Angelegenheiten zu kümmern.

Generell beschränkte sich der Kontakt zum medizinischen Fachpersonal jedoch auf wenige Personen. In zukünftigen Studien sollte deshalb eine größere Anzahl von Ärzten involviert sein und diese gezielt zu bestimmten Problemen befragt werden.

Die Befragungsergebnisse und die medizinischen Resultate bestätigen eindeutig die zu Beginn des Kapitels aufgestellten Hypothesen.

7 Diskussion: Möglichkeiten und Grenzen des Virtual Lab

Der direkten Erörterung und Einordnung der Ergebnisse aus den Analysen, klinischen Untersuchungen und den Nutzerbefragungen im vorhergehenden Kapitel 6 folgt an dieser Stelle die Diskussion des Gesamtsystems *Virtual Lab* als Erprobungs- und Entwicklungsplattform. Aus den Betrachtungen übergeordneter Aspekte, die für den praktischen Einsatz in einem ordentlichen Geschäftsbetrieb nötig sind, lassen sich die Möglichkeiten und Grenzen der telemedizinisch gestützten bioakustischen Hypertonie-Therapie und des Virtual Lab ableiten.

7.1 Der telemedizinische Ansatz

Verschiedene Entwicklungen und Trends in der heutigen Gesellschaft untermauern die These, dass telemedizinische Assistenzsysteme einen nachhaltigen Beitrag für neue und kostengünstige Behandlungsmethoden liefern können.

Der *soziodemographische Wandel* führt zu einer immer älter werdenden Bevölkerung bei gleichzeitiger Zunahme chronischer Erkrankungen. Damit steigen die Anforderungen einer guten und bezahlbaren medizinischen Versorgung an das Gesundheitssystem deutlich. Die Volkskrankheiten wie Bluthochdruck, kardiovaskuläre Erkrankungen, Diabetes mellitus, Atemwegserkrankungen oder Übergewicht nehmen stetig zu, insbesondere bereits bei jüngeren Personen. Weiter wird eine Erhöhung der Fehlzeitentage am Arbeitsplatz aufgrund psychischer oder psychosomatischer Störungen verzeichnet. Eine Ursache dafür ist im zunehmenden Stress und einer als erhöht empfundenen Arbeitsbelastung zu finden.

Der *technologische Wandel* verstärkt diesen Effekt. Durch die rasanten technologischen Entwicklungen auf dem Gebiet der Informations- und Kommunikationstechnik sind enorm leistungsfähige, kleine und mobile Multimedia-Endgeräte mit Netzzugang entstanden, die den Nutzern eine quasi „Rund-um-die-Uhr-Bereitschaft“ zur Kommunikation aufzwingen. Dies hat zu einer „Always-on-Gesellschaft“ bei der jüngeren und mittleren Generation geführt.

Hinzu kommt ein *kultureller und politischer Wandel* hin zu mehr Selbstbestimmung und Selbstverantwortung im Umgang mit der eigenen Gesundheit [199]. Mit umfassenden fundierten Informationen, aktiver Mitwirkung und einfach zu bedienenden, komfortablen Mess- und Endgeräten, ist es möglich ein telemedizinisches sensorgestütztes personalisiertes und individualisiertes Assistenzsystem für Diagnostik und Therapie zu gestalten. Solch ein patientengerechtes Informationssystem fördert maßgeblich die Emanzipation und die informationelle Selbstbestimmung der Nutzer.

Im Zusammenhang mit Telemonitoring-Systemen wird sehr häufig von einer Gesundheitsüberwachung durch den betreuenden Arzt gesprochen. Der strukturelle Aufbau solcher *arztzentrierten* Informationssysteme impliziert die Patientenüberwachung. Die Forderung nach Integration von Telemonitoring-Systemen in das Gesundheitswesen mit all ihren Prozessen, Vorschriften und Abrechnungsmodalitäten verstärkt diesen Eindruck. So entstehen Ängste und Widerstände bei den potentiellen Nutzern trotz weitreichender Datenschutzbestimmungen und Zugriffsbeschränkungen. Im Laufe des Jahres 2009 gab es mehrere Vorkommnisse in großen deutschen Unternehmen im Bereich des Datenschutzes und Lücken durch die Weitergabe persönlicher Daten, so dass das Vertrauen in die Datensicherheit in der Bevölkerung gestört ist und das Misstrauen wächst. Daher muss der Umsetzung entsprechender Sicherheitsmechanismen höchste Beachtung zuteil werden.

Wird der Patient in den Mittelpunkt gestellt und ihm die Verantwortung, mit allen Rechten und Pflichten, über seine Daten gegeben, handelt es sich um ein *patientenzentriertes* Informations- und Telemonitoring-System. Befürchtungen hinsichtlich einer Überwachung können mit solch einem Konzept ausgeschlossen werden. Mit der in dieser Arbeit realisierten Ambient Medicine[®] Plattform, die Basis des virtuellen telemedizinischen Labors, wird genau dieses Konzept verfolgt. Im Zuge der Evaluierung der bioakustischen Hypertonietherapie mittels des Virtual Lab hat sich die letztgenannte Konzeption bestätigt und wurde mit einer hohen Zufriedenheit seitens der

Nutzer ausgewiesen.

Im Rahmen der aktuellen Projekte des AAL¹-Förderschwerpunktes vom BMBF² sind teilweise ähnliche Realisierungen geplant [185]. Sie stehen jedoch erst am Beginn und sind jeweils integrale Bestandteile größerer Vorhaben, die auf eine maximierte Verweildauer in den eigenen vier Wänden mithilfe technischer Systeme ausgelegt sind und zielen somit eindeutig auf die älter werdende Bevölkerung ab.

Die Stärke eines solchen telemedizinischen Systems, wie es in diesem Projekt realisiert wurde, liegt darin, dass es den unterschiedlichsten Anforderungen diverser Nutzergruppen in allen Altersstufen gerecht wird. Abbildung 7.1 zeigt das mögliche Einsatzspektrum des Assistenzsystems. Je nach dem in welcher Phase ein Anwender präventive oder therapeutische Maßnahmen umsetzen möchte, entstehen entsprechend seinem persönlichen Anforderungsprofil unterschiedliche, individuelle medizinische und technische Notwendigkeiten. Individuell heißt hier, zugeschnitten auf die persönliche gesundheitliche Situation, aber auch auf die technische Kompetenz wie Bedienungs- und Nutzungskompetenz sowie individuelle Gewohnheiten.

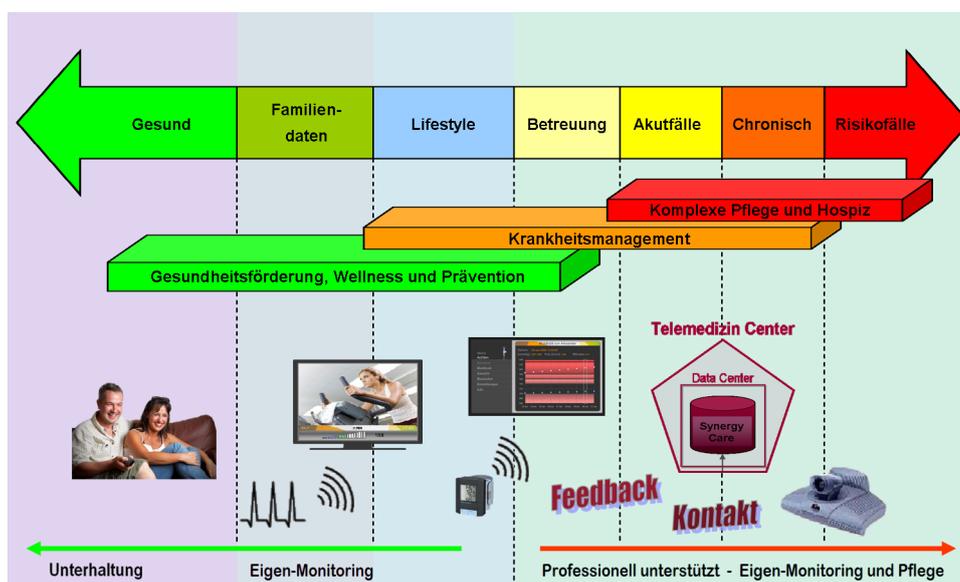


Abb. 7.1: Bedarfsgerechte telemedizinische Assistenzlösungen, entnommen aus Antragsskizze COMES[®]

¹ Ambient Assisted Living

² Bundesministerium für Bildung und Forschung

In einer 2007 vom VDE³ durchgeführten Umfrage hat sich gezeigt, dass bei den Befragten die Meinung vorherrscht, die Medizin nutze den technischen Fortschritt zu wenig. In einer weiteren Umfrage zeigte sich, dass mehr als die Hälfte der Befragten sich für Telemedizin interessiert [18, 20]. Somit stehen der Einführung telemedizinischer Versorgungskonzepte in Diagnostik und Therapie seitens der Patienten keine prinzipiellen Gründe entgegen. Der überwiegende Teil der Ärzte ist von den Vorteilen einer solchen virtuellen Betreuung ebenfalls überzeugt. Zunehmend sind niedergelassene Ärzte und auch Kliniken aus medizinischen Gründen an einer Einführung und Umsetzung in ihrer Praxis interessiert. Diese Einschätzung kann durch viele persönliche Gespräche mit Medizinern im Rahmen dieser Arbeit bestätigt werden.

Die Möglichkeiten aus unterschiedlichen Perspektiven

Aus medizinischer Sicht betrachtet:

- Eine Erweiterung des traditionellen zu einem modernen Arzt-Patienten-Verhältnis mit virtuellen Visiten oder Konsultationen ist sehr gut möglich. Der therapeutische Erfolg mit den sich daraus ergebenden Vorteilen für Arzt und Patient gilt als gesichert und ist medizinisch anerkannt. Gerade die Blutdruckselbstmessung in authentischer Umgebung ist ein bestes Beispiel dafür.
- Bekanntermaßen sinkt die Compliance der Patienten zwischen den Arztbesuchen ab. Durch das automatische Monitoring der Vitalparameter und die regelmäßigen Kontakte zu den betreuten Patienten zwischen den Arztbesuchen oder Klinikaufenthalten wird eine Informationslücke bei den behandelnden Ärzten geschlossen, zudem führt die individuelle Betreuung nachweislich zur Erhöhung der Compliance.
- Typische Empfehlungen für das Therapiemanagement sind umfassende Information über das Krankheitsbild und mögliche Interventionsmaßnahmen sowie ausreichende Schulung und individuelle Motivation des Patienten. Mit dem telemedizinischen Betreuungsansatz ist dies regelmäßig und sehr komfortabel umsetzbar. Es wird eine langfristige Motivation und Aufrechterhaltung der Aufmerksamkeit des Patienten erreicht. Gerade bei Veränderungsprozessen im Lebensstil ist dieses Vorgehen für eine erfolgreiche Zielerreichung essentiell.

³ Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.

- Die Möglichkeiten der telemedizinischen Betreuung sind im Bereich der Rehabilitation besonders vielseitig und erfolgversprechend. Dies schließt eine telematisch gesteuerte Prävention wie auch die postrehabilitative Nachverfolgung ein.
- Unter Fachleuten ist man sich zunehmend einig darüber, dass die gegenwärtig praktizierende Generation von Medizinern überwiegend große Mängel in ihren Anamnese-Fähigkeiten zeigt und zusätzlich in der Anzahl der zur Verfügung stehenden Therapeutika überfordert ist. Die durch Qualitätsmängel in der Ausbildung entstehende diagnostische Unsicherheit führt je nach Temperament des behandelnden Arztes entweder zu kostenträchtigen Interventionsaktivitäten oder zu durch Fahrlässigkeit bedingten Unterlassungen. Sensorgestützte personalisierte Telemedizinergäte in Verbindung mit mobilfunkgestützten Expertensystemen könnten hier die Tätigkeit des Arztes qualitativ verbessern und zur Vermeidung unnötiger Mehrausgaben im Gesundheitswesen beitragen [206]⁴.

Aus ökonomischer Sicht betrachtet:

- Aufgrund der allgemeinen Situation und den aktuellen Entwicklungen im deutschen Gesundheitssystem, wie auch in den USA, Japan und anderen westlichen Ländern, werden dringend neue Lösungen und Möglichkeiten benötigt [208]. Mit dem Einsatz telemedizinischer Lösungen können die Kosten deutlich reduziert werden.
- Auch aus volkswirtschaftlicher Sicht erscheint es sinnvoll, mittels sensorgestützter telematischer Systeme eine stetig älter werdende Bevölkerung „gesund“ älter werden zu lassen. Die Systeme können dabei neben dem eigentlichen Monitoring sowohl die regelmäßige oder bedarfsgesteuerte Einnahme von Medikamenten sicherstellen, als auch konkrete Verhaltensänderungen veranlassen.

Telemedizin-Systeme und telemedizinische Dienstleistungsangebote stehen im Spannungsfeld von Leistungserbringern, Kostenträgern, Juristen, Patienten und der Technik. Daraus ergeben sich einige Barrieren, die einer zügigen Einführung in die alltägliche medizinische Versorgung entgegenstehen. Mit diesen Aspekten beschäftigt sich die Arbeit von Gruber intensiv [78].

⁴ entnommen aus dem Beitrag „Mobilfunk-gestützte medizinische Wissensbasis mit sensorisch interaktiven Mobiltelefonen“

Die Grenzen aus unterschiedlichen Perspektiven

Aus technischer Sicht betrachtet:

- Die Technologie der angebotenen Telemonitoring-Systeme könnte zu komplex sein, um vom Patienten einfach bedient zu werden. Die Folge wäre eine geringe bis fehlende Akzeptanz bei den Nutzern dieser Systeme in der täglichen Verwendung. Aufgrund der bei dem Virtual Lab konsequent realisierten Ein-Knopf-Bedienung mit automatischer Datenübertragung sind das System und die Geräte auf eine hohe Akzeptanz gestoßen. Die künftigen, sehr intuitiven Bedienkonzepte wie es beispielsweise das iPhone von Apple Inc. schon heute bietet, werden das Thema Nutzungskomplexität in den Hintergrund stellen.
- Der fortgeschrittene technische Reifegrad der implementierten Lösung konnte die sonst denkbaren technischen Instabilitäten im täglichen Einsatz auf ein absolutes Minimum reduzieren.
- Es gibt kaum einen Hersteller, der das gesamte Telemedizin-Geräte-Portfolio mit einheitlichen, nicht proprietären Schnittstellen ausstattet. Daraus entstehen deutliche Grenzen in der Flexibilität und Mobilität der eingesetzten Lösungen, die den Patienten nicht den nötigen und gewünschten Spielraum geben. Die meisten Systemanbieter umgehen das Problem, indem sie die Sensoren an eine Basisstation anbinden, die alle erforderlichen Schnittstellenumsetzer enthält. Damit ist dann nur das in Kapitel 3 beschriebene zentrale Systemkonzept realisierbar. Vier verschiedene Ebenen der Interoperabilität sind zu unterscheiden [52]:
 - Interoperabilität auf Protokollebene: die Möglichkeit des Datenaustausches,
 - syntaktische Interoperabilität: die Möglichkeit des Nachrichtenaustausches in bekanntem Format,
 - semantische Interoperabilität, das gemeinsame Verständnis der Bedeutung der ausgetauschten Nachrichten,
 - vom Nutzer wahrgenommene Interoperabilität: die Möglichkeit der Kommunikation verschiedener Geräte untereinander und mit einem übergeordneten System sowie die Verfügbarkeit der gewünschten Dienste.

Die Interoperabilität und somit die herstellerübergreifende Durchgängigkeit der Systeme ist derzeit Gegenstand vieler Förderprojekte und Arbeitsschwerpunkt verschiedener Initiativen, wie z.B. der Continua Health Alliance.

- Die Sicherheit bei der Erfassung, Übertragung, Speicherung und Verwertung der telemedizinisch erhobenen Daten sowie die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems inklusive Peripherie sind außerordentlich wichtig. Im Zweifel können gesundheitliche Schäden beim Patienten aufgrund von Datenverlust oder Nichtverfügbarkeit des Systems entstehen. Gerade Hochrisikopatienten sind auf zuverlässige und sofortige Reaktionen durch die Telemedizin-Dienstleister angewiesen. Dazu gehört auch die flächendeckende und ausreichende Funknetzversorgung seitens der Mobilfunkanbieter. Die von den festnetzbasieren digitalen Nebenstellenanlagen gewohnte Verfügbarkeit von 99,9999 % wird von den Mobilfunk- oder Internetanbietern nicht gewährleistet. Durch die Zwischenspeicherung der Daten in den Messgeräten bzw. den Mobiltelefonen kann im Normalfall ein eventueller Ausfall von bis zu mehreren Tagen überbrückt werden. Während der gesamten Erprobungszeit des Virtual Lab gab es keinen Ausfall des Mobilfunknetzes oder des Datennetzes im Rechenzentrum, in dem die Datenbank SynergyCare gehostet wird.

Aus juristischer Sicht betrachtet:

- In Deutschland gelten strenge gesetzliche Auflagen hinsichtlich der medizinischen Behandlung. Im Zusammenhang mit dem Fernbehandlungsgesetz herrscht eine gewisse rechtliche Unsicherheit, welche wiederum auf die Ärzte irritierend wirkt. Dies beschränkt die erlaubten telemedizinischen Möglichkeiten für einen Regelbetrieb deutlich. Beispielsweise dürfen hierzulande keine Medikationen fernmündlich verordnet oder elektronisch versendet werden. Weiterreichende Interventionen wie Handlungs- oder Therapieanweisungen sind ebenfalls ausgeschlossen. Aber gerade diese Interventionsmöglichkeiten aus der Ferne bilden den größten Mehrwert telemedizinischer Assistenzsysteme. Zur Zeit können diese Maßnahmen nur in Projekten wie klinischen Studien oder technischen Feldtests erprobt werden.

- Aufwendige Zulassungsprozeduren aufgrund des MPG⁵ hemmen viele Unternehmen bereits im Vorfeld bei der Entwicklung oder Produkteinführung.

Aus ökonomischer Sicht betrachtet:

- Trotz hoher Akzeptanz bei Patienten und Ärzten von telemedizinischen Lösungen sind die Möglichkeiten in der Breite noch zu wenig bekannt. Eine wesentliche Hürde ist die noch zu klärende Kostenübernahme telemedizinischer Leistungen. Zur Zeit sind diese Lösungen nicht in der Regelversorgung und es existiert keine Abrechnungsziffer dazu. Einige Installationen in geförderten Projekten und Verträge für Disease- Management-Programme im Rahmen der Integrierten Versorgung analysieren das Einsparpotential telemedizinischer Behandlungen oder auch die Bereitschaft zur Selbstzahlung.
- Der Ressourcenaufwand bei den Herstellern und Lösungsanbietern ist sehr hoch, da die angebotene Technik immer den neuesten Innovationen standhalten muss. Insbesondere bei den mobilen Endgeräten wie PDAs, SmartPhones oder Netbooks herrscht eine enorme Innovationsgeschwindigkeit. Fast halbjährlich erscheinen neue Modelle.

Trotz aller Projekterfolge und positiven Effekte bei der technischen Umsetzung der beschriebenen Lösungen müssen noch einige Hürden überwunden werden, um allen Bürgern die Nutzung solcher sensorgestützter Assistenzsysteme zu ermöglichen. Neben der Lösung noch offener ökonomischer, sicherheitsrelevanter und juristischer Fragestellungen bedürfen die Systeme für eine breite Akzeptanz und Marktdurchdringung einfachste Bedienbarkeit bei höchstem Komfort.

7.2 Das Virtual Lab

Die im Kapitel 1 auf Seite 7 gemachten Aussagen zu den Möglichkeiten und dem Nutzen eines virtuellen telemedizinischen Labors sollen hier nochmals kurz betrachtet werden. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass alle dort aufgestellten Thesen in der Praxis bestätigt worden sind.

⁵ Medizinproduktegesetz, nationale Umsetzung der europäischen Richtlinie nach 93/42/EWG für Medizinprodukte

Die Möglichkeiten des Virtual Lab

Die wichtigste Kernaussage zum Virtual Lab ist der immense diagnostische und therapeutische Gewinn für Arzt und Patient, der durch die Datenerhebung im authentischen Umfeld der Patienten erzielt wird. Durch die laufende Beobachtung werden Veränderungen in der Krankheitsdynamik schnell erfasst und insbesondere Verschlechterungen frühzeitig erkannt und bestmöglich aufgefangen. In vielen Fällen wird dadurch die Lebensqualität des Patienten erhöht.

Die Bedeutung des virtuellen Betreuungsansatzes kann nicht hoch genug eingeschätzt werden, denn viele Krankheitsbilder (z.B. chronische Herzinsuffizienz, Adipositas oder metabolisches Syndrom usw.) erfordern die simultane Beobachtung mehrerer Parameter. Am Beispiel des Bewegungsmonitorings soll dies verdeutlicht werden. Allein durch regelmäßige Bewegung von 10.000 Schritten pro Tag kann eine deutliche Verbesserung des Gesundheitszustandes erreicht werden. Ausreichende Bewegung hat eine Gewichtsabnahme zur Folge, die bereits für sich alleine eine Blutdrucksenkung oder Verbesserung anderer physiologischer Werte bewirkt. Dies sind jedoch genau die lebensstilverändernden Maßnahmen, die den Patienten eine hohe Motivation und Persistenz abverlangen. Durch regelmäßige Rückmeldung der in diesem Fall zurückgelegten Schritte und des damit verbundenen Kalorienverbrauchs kann eine dauerhafte Aufmerksamkeit und Motivation aufrecht erhalten werden. Diese erhöhte Motivation wiederum gewährleistet eine Konstanz in der Therapieadhärenz und einen erfolgreichen Verlauf im gesamten Therapieprozess. Dagegen wäre bei einer stationären Behandlung die Kontrolle der Durchführung von Therapiemaßnahmen von mehreren Stunden über den Tag verteilt in keiner Weise möglich. Die telemedizinische Erfassung und Übertragung der Bewegungsdaten ermöglicht diese Beobachtung. Zusätzlich sind somit zeitnahe therapiesteuernde oder motivationsfördernde Rückmeldungen möglich.

Diese Parameter können sinnvoll nur im authentischen Lebensumfeld erfasst werden, alle anderen Erhebungen ergeben einen verfälschten Eindruck. Ein weiteres Anwendungsszenario liefert die frühzeitige Sturzerkennung bei älteren Menschen im heimischen Umfeld.

Die Beobachtung verschiedener physiologischer Parameter erlauben beiden, dem Patienten wie dem Therapeuten, ein direktes Feedback über die Wirkungsweise und Effizienz der therapeutischen Interventionen oder empfohlenen Übungen.

Das Virtual Lab hat sich als Erprobungs- und Entwicklungsplattform für neue technologischen Lösungen wie auch für systemische Therapieansätze voll und ganz bestätigt. Somit bestehen vielfältige Einsatzmöglichkeiten in folgenden Bereichen:

- virtuelle Forschung- und Entwicklung,
- Untersuchung wissenschaftlicher, medizinischer, pharmakologischer oder verhaltenstherapeutischer Fragestellungen
- Durchführung klinischer Studien
- virtuelle Therapieführung und individuelles Coaching aus der Ferne,
- genderspezifische Untersuchungen, beispielsweise zur Analyse des technischen Nutzungsverhaltens oder im medizinischen Sinne zu genderspezifischen Wirkungsmustern,
- und weitere Forschungsprojekte des Heinz Nixdorf-Lehrstuhls für Medizinische Elektronik

Das System ist nicht auf die Messung des Blutdruckes beschränkt, sondern kann durch die Integration von weiteren Sensoren, beispielsweise in die Blutdruckmanschette, komplexe interventionskorrelierte Datenmuster erzeugen.

Die Untersuchungen mit dem Virtual Lab haben klar gezeigt, dass die Erhebung authentischer Datenmuster in personalisierter Umgebung der Patienten sehr gut und zuverlässig möglich ist. Damit erhält man erstmals einen unmittelbaren wirklichkeitsgetreuen Eindruck von beliebigen Interventionsstrukturen. Es wurde festgestellt, dass die Compliance der Patienten bei einer derartig personalisierten Therapie gegenüber herkömmlichen Behandlungsmethoden deutlich erhöht ist. Durch die regelmäßigen Rückmeldungen an den Nutzer ist ebenfalls dessen Akzeptanz und Bereitschaft zur aktiven Mitwirkung bei therapeutischen Massnahmen erheblich gestiegen. Diese Resultate lassen den Schluss zu, dass sensorgestützte, telematische Assistenzsysteme einen wesentlichen Beitrag zu mehr Selbstverantwortung hinsichtlich der eigenen Gesundheit und medizinischer Autonomie leisten.

Das Virtual Lab als sensorgestützte telemedizinische, individualisierte, personalisierte Diagnose- und Therapieplattform mit kontextabhängigen interaktiven Feedback und

Interventionen konnte nahezu vollständig realisiert werden. Einzig die Kontextabhängigkeit und Algorithmen zur komplexen Zeitreihen- und Korrelationsanalyse der Daten sowie der Abgleich mit externen Datenbanken als Basis für eine evidenzbasierte Medizin bedürfen noch der Umsetzung.

Auch im Bereich der sekundären Prävention führte das beschriebene System zwangsläufig zu einer verbesserten Rehabilitation. In der meist nur dreiwöchigen Verweildauer in einer Reha-Klinik ist es im Allgemeinen nicht möglich, die notwendigen Bewusstseins- und Verhaltensänderungen der Patienten herbeizuführen. Mithilfe des Virtual Lab ist dem behandelnden Arzt eine geeignete individuelle Patientenführung möglich.

Individualisierung und Personalisierung

Eine Diversifizierung der Lösungsangebote unter Berücksichtigung von individuellen Bedürfnissen der Patienten ist aufgrund der vielen unterschiedlichen Charakteren mit individuellen Reaktionsmechanismen nötig.

Im Zusammenhang mit der individuellen Adaption von technischen Geräten oder Anwendungsapplikationen wird oft von **Individualisierung** und **Personalisierung** gesprochen, wobei es sich hier nicht um Synonyme handelt. Unter *Individualisierung* versteht man vor allem das Bereitstellen von Funktionalitäten zur Modifikation von bestimmten Faktoren nach persönlichen Präferenzen. Zu diesen Faktoren zählen beispielsweise die Farbgebung oder die Position bestimmter Objekte in einer Benutzeroberfläche. Die Möglichkeiten der Individualisierung von Mobiltelefonen beispielsweise wurden stetig erweitert. So lassen sich mittlerweile auf nahezu jedem Mobiltelefon Hintergrundbilder ändern oder es kann die Auswahl von Soundfiles bei eingehenden Anrufen oder Nachrichten beliebig variiert werden.

Im Gegensatz dazu erfolgt die Anpassung eines Inhaltes auf einen spezifischen Benutzer bei der *Personalisierung* durch das System selbst. Damit das System die Anpassung vornimmt, benötigt es Information über einen Nutzer. Der Personalisierungsprozess lässt sich in drei Phasen untergliedern:

- Informationsakquise
- Informationsanalyse
- Personalisierung des Systems

Die Informationssammlung erfolgt idealerweise automatisch durch eine Softwarelösung. Derartige Mechanismen sind beispielsweise in vielen Online-Shops wie etwa Amazon integriert. Anhand des Kaufverhaltens wird dem Kunden ein Profil zugeordnet. Infolgedessen werden dem Kunden bei seinem nächsten Besuch Produkte empfohlen, die zu diesem Käuferprofil passen [19, 67].

So sind über das Virtual Lab auf die Patienten zugeschnittene therapeutische Angebote, Hintergrundinformationen und Inhalte leichter zugänglich, verständlich und nutzbar. Gerade bei der akustischen Biofeedback-Therapie stellt die Individualisierung ein wichtiges Erfolgskriterium dar. Wird die Therapie am persönlichen Musikgeschmack ausgerichtet, ist die Motivation zur Durchführung der Therapiesitzung, d.h. dem Anhören der Musik, deutlich erhöht, flankiert von dem positiven Nebeneffekt einer hohen Compliance. Die realisierte automatisierte Interventionsstrecke des Virtual Lab erlaubt es dem Patienten situationsabhängig und nach Bedarf beliebige therapeutische Interventionssequenzen einzuspielen.

Die Informationsakquise und -analyse erfolgt mit einem interaktiven elektronischen Datenerfassungs- und Fragebogen. So wird auf einfache Weise gewährleistet, dass der Betreuer alle individuellen Wünsche berücksichtigen und entsprechende Einstellungen vornehmen kann. Daraus kann eine Einteilung der Patienten in eine Betreuungsstufe und in eine Kostenstufe abgeleitet werden, welches für einen Telemedizin-Dienstleistungsanbieter wichtig ist. Ein Patient, der angibt sich allgemein wenig mit Mobiltelefonen und deren Bedienung auszukennen, muss intensiver betreut werden und erhält dementsprechend eine höhere Einstufung. Bei den Kosten spielen vor allem kostenintensive Komfortfunktionen wie automatische Erinnerungsfunktionen oder eine persönliche Kontaktaufnahme durch den technischen Betreuer eine Rolle. In Zukunft soll die Erinnerungsfunktion sowohl durch direkte Benachrichtigungen auf das Endgerät, als auch durch automatische Anrufe erfolgen.

Die Grenzen des Virtual Lab

Grenzen oder Nachteile hat das Virtual Lab nur wenige. Diese betreffen im Wesentlichen verhaltensbezogene Risiken wie Bedienungsfehler, Nichteinhalten der Vorgaben oder direkte Manipulationsversuche durch den Patienten.

Gefahren der Selbstmessung bestehen in falsch durchgeführten Messungen, in der Nichteinhaltung vorbereitender Maßnahmen im Rahmen des Settings, wie z.B. 5 Minuten ruhiges Sitzen vor einer Blutdruckmessung, in der fehlerhaften Bedienung des Messgerätes und Ähnlichem. Im Unterschied zur klinischen Therapie ist hier keine direkte Kontrolle und Korrektur der Blutdruck-Messung oder der Übungen eines Patienten möglich. Unregelmäßigkeiten, Auffälligkeiten oder Fehler können indirekt über die Prüfung und Verifikation der Messwerte erkannt werden. Allerdings stehen Ärzte und Therapeuten bei einer traditionellen medikamentösen oder stationären Therapie vor der gleichen Herausforderung, jedoch ohne die Möglichkeit der kurzfristigen Parameterkontrolle. Des Weiteren kann es bei stationären Aufenthalten ähnliche Probleme aufgrund von Personalmangel bzw. -überlastung geben. Abhilfe kann die automatische Übermittlung eines Markers im Sinne einer positiven Quittung nach Durchführung von Übungen, Musikhören oder Medikamenteneinnahme schaffen.

Sicherheit und Zuverlässigkeit

Die eingesetzten mobilen Telemedizinergäte müssen ortsungebunden und länderübergreifend funktionieren, um den erhöhten Mobilitätsanforderungen gerecht zu werden. Dies setzt eine hohe Zuverlässigkeit der Einzelkomponenten, der Netzinfrastruktur sowie standardisierte Schnittstellen und Übertragungsprotokolle voraus. Um gesundheitliche Gefahren oder gar Schäden abzuwenden, müssen die Risiken zuverlässig beherrscht werden. Beispielsweise helfen bei Verlust oder Manipulationsversuchen geeignete Authentifizierungsmethoden. Dadurch können Verwechslungen durch die Nutzer vermieden werden.

Weitere **Fehlerquellen** liegen in der bewussten Manipulation der Messdaten. Es ist bekannt, dass Patienten bei der manuellen Blutdruck-Tagebuchführung nicht immer korrekt sind und so Abweichungen gegenüber den eigentlichen Messwerten nach oben und unten auftreten können [133]. Zum einen ist das Risiko bei der telemedizinischen Datenerfassung und -übertragung aufgrund des dafür erforderlichen technischen Vorwissens deutlich verringert, zum anderen können im Messgerät implementierte Personenerkennungsmaßnahmen Abhilfe schaffen. Denkbar sind beispielsweise die Eingabe einer persönlichen PIN, oder die Authentifizierung mittels biometrischer Verfahren wie dem Fingerabdruck oder einer Ganganalyse geschehen.

Patient, Arzt und bei entsprechender Konsultierung auch das Telemedizin-Center können über ein Web-Interface sowohl auf Daten und Auswertungen zugreifen. Den

hohen Anforderungen an die Datensicherheit wird durch eine Verschlüsselung aller übertragenen Daten Rechnung getragen. Der Zugriff auf das Web-Interface erfolgt ausschließlich mit gültiger Autorisierung.

Fazit

Das implementierte virtuelle Telemedizin-Labor bietet zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten in Diagnostik und Therapie. Es ist möglich, authentische Datenmuster in personalisierter Umgebung der Patienten zu erheben und damit erstmals einen unmittelbaren wirklichkeitsgetreuen Eindruck von beliebigen Interventionsstrukturen zu erhalten. Das Virtual Lab stellt somit eine ideale Entwicklungs- und Erprobungsplattform für personalisierte Therapien, sowie weiterer therapeutischer Konzepte dar. In Kombination mit den etablierten Biofeedback-Systemen stellt unser telemedizinisch gestütztes Assistenzsystem eine hervorragende Ergänzung für Therapeuten und Ärzte dar. Sie erhalten ein weiteres Instrument an die Hand um ihre Patienten aktiv in den Therapieprozess einzubinden, insbesondere zu Hause in deren authentischer Umgebung.

Allerdings ist für den selbstbestimmten und –verantwortlichen Umgang des Patienten mit seinen eigens erhobenen Daten ein zeitnahe „Feedback“ notwendig. Nur dann erhält er die nötige Handlungs- und Entscheidungssicherheit bzw. ist eine virtuelle Therapieführung durch den behandelnden Arzt möglich. Das Feedbacksystem wird über das Mobiltelefon zu einem geschlossenen Kreislauf. Über diese bidirektionale Verbindung zwischen Patient und Arzt können neben diesen Messwert- und anderen Textnachrichten auch Ton- und Bildmitteilungen verschickt werden. Damit besteht nicht nur eine reine Datenübertragung vom Patienten zur Datenbank bzw. zum betreuenden Arzt. Vielmehr hat nun das medizinische Personal bzw. ein hinter der Datenbank stehendes Expertensystem die Möglichkeit, über eine Interventionsstrecke direkt auf den Therapieverlauf Einuß zu nehmen und diesen zu individualisieren.

Neben nicht medikamentösen Therapien wie das akustische Biofeedback, können ebenso zirkadiane oder genderspezifische Einüsse auf den Blutdruck- bzw. den Therapieverlauf untersucht werden. Das virtuelle Labor ermöglicht die bei all diesen Anwendungen erforderliche Erhebung von authentischen Vitalparametern in Echtzeit.

7.3 Die akustische Biofeedback-Therapie

Das Virtual Lab mit der multiparametrischen telematischen Sensorenplattform generiert umfassende systemische Daten im authentischen Umfeld. Damit wird erstmalig ein Weg beschritten, der auch die Entwicklung systemischer Therapiekonzepte ermöglicht. Biofeedback in jedweder Form kann einen Zugang zu solchen Therapieansätzen liefern, die dann entsprechend strukturiert werden können. Die Funktionalität dieser Vorgehensweise nachzuweisen war ein Ziel dieser Arbeit. So wurde aus den in Kapitel 2 ausgiebig dargelegten Gründen eine nicht medikamentöse Therapie als Regulativ bei primärer Hypertonie entwickelt, evaluiert und etabliert. Kernelement des therapeutischen Konzeptes ist die Intervention mittels Musik im Sinne eines pharmakologischen Wirkstoffes. Gleichzeitig sollten persönliche Faktoren berücksichtigt und eine individuelle Therapie unterstützt werden können. Dies ist mit der akustischen Biofeedback-Therapie vollständig gelungen.

Die Möglichkeiten

Die Wünsche vieler Therapeuten und Patienten hinsichtlich einer gut wirksamen und komfortablen Therapie beinhalten kleine, smarte, mobile und kostengünstige Messgeräte, flexible, individuelle und möglichst nicht medikamentöse Interventionen [109]. Die hier vorgestellte telemedizinisch gestützte akustische Biofeedback-Therapie erfüllt in Gänze genau diese Anforderungen.

Die nachgewiesene hohe Akzeptanz und Therapietreue einerseits bezüglich des prinzipiellen Ansatzes, andererseits bezüglich der Anwendung beinhaltet ein sehr hohes Potential für künftige Anwendungen, mit verbesserten therapeutischen Ergebnissen bei gleichzeitig vereinfachten und kostengünstigen Behandlungsmethoden.

Eigene Befragungen und Gespräche mit Betroffenen ergaben, dass gerade viele Grenzhypertoniker eine Medikamenteneinnahme vermeiden wollen. Sie wünschen sich komplementäre, nicht medikamentöse Behandlungsformen. Da die medizinischen Resultate hinsichtlich der deutlichen Blutdrucksenkung sehr erfolgreich und vielversprechend sind, ist die akustische Intervention sehr geeignet und erfüllt die Erwartungen der Patienten. Dabei unterstützt und erleichtert sie sämtliche Lebensstiländerungen. Denn Änderungen der alltäglichen persönlichen Gewohnheiten sind Voraussetzung für den Heilungserfolg. Konsequenterweise führt dies zu mehr Bewegung, Änderung der

Ernährung, Gewichtsreduktion sowie Stressabbau mithilfe geeigneter Entspannungsverfahren, welche wiederum musikalisch gestützt sein können. Life-Style-Änderungen gehören zu den am Schwierigsten durchzuführenden Veränderungen und erfordern ein hohes Durchhaltevermögen und eine hohe intrinsische Motivation. Mit einer telemedizinischen Betreuung im Sinne eines Personal Trainers oder Coaches sind die Erfolgsaussichten solcher Change-Management-Programme deutlich erhöht [87, 135]. Stetige Rückmeldungen, also ein zielgerichtetes Feedback, und eine dialogorientierte Kommunikation sind äußerst wichtig und absolute Voraussetzung für ein erfolgreiches Abschließen persönlicher Veränderungsprogramme.

Technisch stellt der Anspruch an Kommunikation und Dialogführung keinerlei Problem dar. Die bidirektionalen Übertragungswege ermöglichen jegliche gewünschte Kommunikation, sei es in Wort, Bild oder Ton. Dabei ist das Automatisierungs-, Personalisierungs- und Individualisierungspotential bei weitem noch nicht ausgereizt. Gerade die aktuellen Innovationen in der Informations- und Kommunikationstechnologie bieten mannigfaltige und weitreichende Möglichkeiten.

Die Grenzen

Wie bei allen komplementärmedizinischen Konzepten ist auch hier die Frage zu stellen: Wo liegt die Grenze zur Schulmedizin und wann ist eine medikamentöse Therapie indiziert. In beiden Fällen setzt es ein hohes Bewusstsein, eine hohe Aufmerksamkeit und Verantwortung im Umgang mit der Krankheit an den betreuenden Arzt sowie an die Patienten selbst voraus. Im Gegensatz zur traditionellen Behandlungsweise mit Arztpraxisbesuchen im Abstand von mehreren Wochen erlaubt die telemedizinisch gestützte akustische Biofeedback-Therapie in einfacher Weise ein regelmäßiges Monitoring der maßgeblichen Parameter. Fehlentwicklungen werden so frühzeitig wahrgenommen und Gegenmaßnahmen können umgehend eingeleitet werden. Dadurch ist das gesundheitliche Risiko als gering einzustufen. Die bereits beschriebenen Vorteile überwiegen.

Eine natürliche Grenze der akustischen Biofeedback-Therapie sind organische Erkrankungen, wie sie bei der sekundären Hypertonie zugrunde liegen. Die Regulation des Blutdruckes ist dann aufgrund einer z. B. manifesten Herzerkrankung oder Nierenschädigung gestört, so dass die Modulationen des vegetativen Nervensystems diese Störungen nicht mehr ausgleichen können. Somit ist bei Anwendung akustischer

Interventionen keine Verbesserung zu erwarten. Allerdings können in diesen Fällen die positiven Nebeneffekte einer erhöhten Entspannungsfähigkeit oder Stressreduktion durch Musik ergänzend eingesetzt werden.

Gewöhnungseffekte durch eine regelmäßige, längerfristig durchgeführte Musiktherapie und eine damit verbundene sinkende Therapieadhärenz können nicht ausgeschlossen werden. Im Allgemeinen entspricht das dem durchschnittlichen Verhalten eines Menschen, auch bekannt als „Fitness-Studio-Effekt“. Allerdings ist das Risiko nicht sehr groß, denn durch die hohen Anpassungsmöglichkeiten des Virtual Lab können nach Bedarf wechselnde individuell ausgewählte Musikstücke eingespielt werden. Darüber hinaus ist wieder die beliebig häufige Kontaktmöglichkeit zwischen Arzt, Telemedizin-Center und Patient zu strapazieren. Durch die virtuellen Konsultationen oder Sprechstunden werden stets erneute Impulse gesetzt, die der Aufrechterhaltung der intrinsischen Motivation und somit der Verhinderung von Gewöhnungseffekten dienen.

Zu Beginn des Projektes war der Ausstattungsgrad der Mobiltelefone noch nicht befriedigend. Die Displaygröße war relativ klein, der verfügbare Speicherplatz sehr beschränkt und die Anschlussmöglichkeiten von externen Kopfhörern aufgrund herstellerspezifischer Schnittstellen kaum gegeben. Allerdings ist die Entwicklung enorm schnell vorangeschritten, so dass diese Aspekte seit den letzten zwei Jahren keine Rolle mehr spielen. Mit den heutigen multimediafähigen Smart Phones sind all diese Anforderungen leicht erfüllt. Große Touchscreens, Speicherplatz von mehreren Gigabytes, standardmäßige Anschlüsse wie z.B. Klinke oder USB, integrierte Kameras für Foto- oder Filmaufnahmen, Internet-Zugang sowie Streaming-Möglichkeiten von Radio und TV und vieles mehr sind Stand der Technik. Damit lassen sich beliebige akustische Interventionsprogramme bei bester Audioqualität zusammenstellen und realisieren.

In dem jetzigen Realisierungsstadium ist der interaktive Dialog inklusive Befindlichkeitsabfragen und Ausgangszustandsbestimmung vorgesehen, aber noch nicht komfortabel genug gelöst. Eine umfassende Erfassung des Kontextes ist zur Zeit nicht möglich. Dies ist jedoch aus medizinischen Gründen sehr wichtig, um die Therapie und Intervention regelmäßig individuell an die Ausgangssituation und Ausgangswerte der Patienten anzupassen. Abbildung 7.2 zeigt dieses Prinzip exemplarisch an einem auf einem PDA realisierten Beispiel.

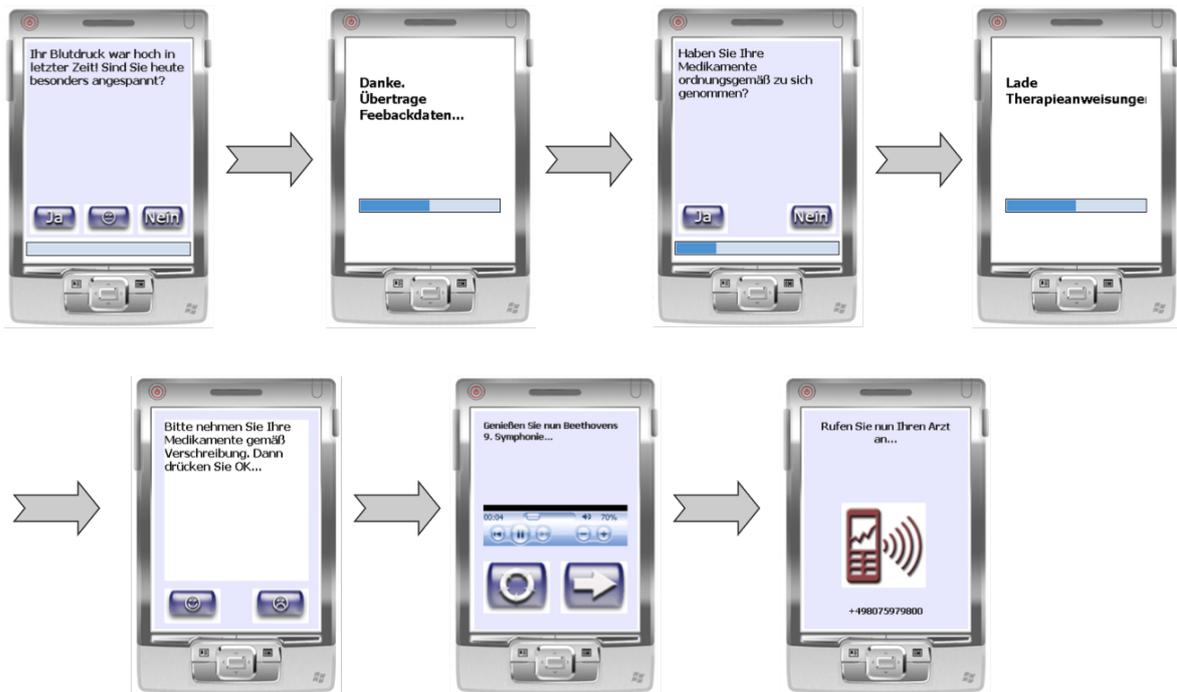


Abb. 7.2: Personalisiertes Feedback mit interaktivem Dialog

Es sind folgende Kategorien von Context Awareness zu unterscheiden:

- Umgebungskontext
- Situationskontext
- persönlicher Befindlichkeitskontext
- persönlicher Gesundheits- bzw. Krankheitskontext

Die Kenntnis der beiden letztgenannten Punkte ist für die optimale Wirkung der akustischen Biofeedbacktherapie wichtig. Es ist bekannt, dass eine sehr aufgeregte Person mit hohem Level sympathischer Erregung nicht sofort mit einem Musikstück von sehr beruhigenden und trophotropen Charakter auf ein niedriges Level heruntergezogen werden kann [43, 73, 182]. Dafür ist es angebracht, die Person auf dem hohen Level abzuholen und in Zwischenstufen auf eine niedrige Erregungsstufe hinabzuführen. Musikalisch eignen sich dafür beispielsweise Stücke mit einem höheren Tempo und leicht anregendem Charakter, die dann in trophotropen Stücke münden.

Musikhören oder die Einwirkung von Stress hat Einfluss auf die Endorphinausschüttung und Bildung von Katecholaminen. Um die beruhigende und blutdrucksenkende Musikwirkung und die bisherigen empirisch ermittelten guten Ergebnisse klinisch zu validieren, wäre die Messung und Ermittlung endokrinologischer und biochemischer Parameter erforderlich. Dafür sind Blut-Analysen oder eine kumulative 24h-Urinsammlung geeignet. Diese Untersuchungen sind in dieser Arbeit aus mehreren Gründen nicht durchgeführt worden. Zum einen existieren sehr viele Studien mit dem wissenschaftlichen Nachweis, dass Musik blutdrucksenkend wirkt und die genannten Parameter verändert. Zum anderen erfordern diese Untersuchungen medizinisches Personal mit der Berechtigung, Blut abzunehmen, sowie ausreichend viele gewillte Probanden. Letzteres stellte ein Problem dar, denn die meisten Probanden wollten dies nicht. Erschwerend kam hinzu, dass diese Untersuchungen in der mit uns kooperierenden Klinik zu logistischen und prozessbedingten Problemen geführt hätten. Somit wurde auf diesen Nachweis verzichtet.

Ein am Markt vergleichbares Therapiekonzept gibt es in Form der Audiotherapie, „Musik die wirkt“ welche über die Sanoson GmbH mit Sitz in Wien angeboten wird. Dahinter steht die Forschergruppe um Vera Brandes, seit 2004 Leiterin des Forschungsprogramms MusikMedizin an der Paracelsus Medizinischen Privatuniversität Salzburg. Kernpunkt ihres entwickelten Musikprogramms ist die absolute Einmaligkeit der therapeutisch eingesetzten Musikstücke und des Zeitpunkts des Anhörens. Um mögliche Konditionierungseffekte zu vermeiden, vertritt sie die These, der Patient dürfe das Musikstück überhaupt nicht kennen. Dafür wird für jeden Patienten das Audiomaterial neu komponiert und generiert. Nur so sind auch unbewusste Effekte ausgeschlossen, falls der Hörer ein Musikstück eventuell in Verbindung mit Negativ- oder Traumasituationen gehört hat. Diese Vorgehensweise stellt einen enormen Aufwand in der Vorbereitungsphase dar und ist für eine Breitenanwendung kaum vorstellbar.

Das Konzept der akustischen Biofeedback-Therapie stellt ebenfalls die Individualisierung in den Mittelpunkt. Da hier ausschließlich auf kommerziell verfügbares Klangmaterial zurückgegriffen wird und mittels des Klassifikators dessen trophotrope Wirksamkeit analysiert werden kann, steht hinter diesem Vorgehen ein deutlich geringerer Aufwand, zumal diese Prozesse automatisiert werden können. Darüber hinaus bleibt so die gewünschte Flexibilität gewahrt, um die oben ausgeführten erforderlichen bedarfsorientierten musikalischen Auswahlmöglichkeiten anbieten zu können.

Fazit

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die akustische Biofeedback-Therapie eine sinnvolle Applikation ist. Die technischen Möglichkeiten wurden weitreichend genutzt, aber nicht ausgeschöpft. Es konnte gezeigt werden, dass Telemedizin weit mehr beinhaltet als die reine sensorgestützte Datenerhebung, Datenübertragung und -speicherung. Der Mehrwert liegt in der geschickten Kombination aller Maßnahmen, der intelligenten Auswertung aller eingegangenen Daten und einem daraus abgeleiteten Feedback inklusive der automatisierten Interventionsmöglichkeit.

Der entwickelte Klassifikator ermöglicht nun erstmals die Untersuchung beliebiger vom Patienten gewünschter, klassischer Musikstücke auf ihre blutdrucksenkende Wirkung. Zudem ist es möglich aus Musikstücken, die insgesamt eine indifferente Wirkung haben, speziell wirkende Passagen für die akustische Biofeedback-Therapie zu extrahieren. Dies gestattet eine optimale Modulation des Blutdruckes.

Da nicht alle Patienten gleichermaßen auf jedes Musikstück ansprechen, ist eine medizinische Betreuung der akustischen Biofeedbacktherapie nach wie vor empfehlenswert. Durch die selbst gewählte Musik und die aktive Beteiligung der Patienten wird jedoch die Akzeptanz und Compliance der Therapie wesentlich verbessert und damit auch der Behandlungserfolg.

Diese Arbeit stellt die Grundlage zur Entwicklung innovativer therapeutischer Strategien dar. Es ist nun möglich, unter Berücksichtigung persönlicher Präferenzen der Patienten, eine vollkommen individualisierte und personalisierte Therapie zu konzipieren und anzubieten.

8 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war, ein virtuelles telemedizinisches Labor, das Virtual Lab, als Entwicklungs- und Erprobungsplattform für personalisierte und individualisierte Therapien zu realisieren und an einem konkreten Forschungsansatz, der Hypertonie zu testen. Nach Ausführung der physiologischen, medizinischen und theoretischen Grundlagen, die für das Verständnis der Wirkmechanismen und den Aufbau der Gesamtlösung wichtig sind, wurde die Bedeutung der Virtual Lab-Struktur für die Entwicklung von Biofeedback-Therapien herausgearbeitet. Anschließend folgte im Kapitel 3 die detaillierte Beschreibung des internationalen Standes der Technik aller benötigten und beteiligten Disziplinen. Dies umfasste die Analyse der Informations- und Kommunikationssysteme und der heutigen Telemedizinaktivitäten und -angebote.

Musik ist nahezu so alt wie die Menschheit selbst. Bereits seit Jahrhunderten wird Musik in Medizin und Therapie erfolgreich eingesetzt. Die neuesten Erkenntnisse und Produkte wurden im Kapitel 3.3 vorgestellt. Kapitel 4 beschäftigte sich mit dem Aufbau der virtuellen Entwicklungsumgebung, dem Virtual Lab. Sämtliche Teilkomponenten und deren Integration in das Gesamtsystem wurden beschrieben. Das Kapitel schloss mit der Ausführung zu den Grundlagen des akustischen Materials, da dies essentieller Bestandteil der weiteren Analysen war, sowie der verwendeten Methodik zur Bestimmung der blutdrucksenkenden Marker.

Die umfassenden Erprobungen, Untersuchungen und Feldversuche um, für und mit dem Virtual Lab wurden im Kapitel 5 ausgeführt. Diese gliederten sich in Untersuchungen zur Technik, zu dem akustischen Material sowie zu den klinischen Tests mit

Probanden, um die blutdrucksenkende Wirkung der akustischen Interventionssequenzen nachzuweisen und medizinisch zu untermauern.

Im Rahmen einer prospektiven Beobachtungsstudie (N=20) wurde gezeigt, dass die der Intervention dienenden akustischen Sequenzen und Klangstrukturen den Blutdruck signifikant senken können (t-Test). Der Blutdruck konnte im Mittel um -2,57 mmHg (systolisch) und -1,54 mmHg (diastolisch) bei einer Signifikanz von 1,3 % (systolisch) und 0,3 % (diastolisch) gesenkt werden. Damit ist diese Methode mit medikamentösen Interventionen vergleichbar.

Die klinische Untersuchung, sowie weitere Messserien mit dem beschriebenen System haben gezeigt, dass Messungen im authentischen Umfeld eine präzise Zuordnung der Messdaten zur jeweiligen Umgebung ermöglichen. Die Akzeptanz bei den Versuchspersonen war aufgrund der technischen Reife des Systems überraschend gut. Alle Teilnehmer an den Versuchsreihen empfanden insbesondere den möglichen Kommunikationsaufbau mit dem Therapeuten als sehr vorteilhaft. Die erhobenen Datensätze ergaben aufschlussreiche neue Erkenntnisse. Die aus den Resultaten abgeleiteten Optionen zur Berücksichtigung individueller Bedürfnisse, Automatisierung der Betreuung und Optimierung hinsichtlich Komfort und Nutzerorientierung wurden in das Assistenzsystem integriert.

Mit dem entwickelten Klassifikator können nun beliebige vom Patienten gewünschte, klassische Musikstücke erstmals auf ihre blutdrucksenkende Wirkung untersucht werden. Zudem ist es möglich aus Musikstücken, die insgesamt eine indifferente Wirkung haben, speziell wirkende Passagen für die akustische Biofeedback-Therapie zu extrahieren. Dies gestattet eine optimale Modulation des Blutdruckes.

Die Auswertungen wurden dargestellt und nach Bedarf einer Einzelfallbetrachtung unterzogen. Eine Zusammenfassung der Analysen und Ergebnisse erfolgte in Kapitel 6. Schließlich wurden die Möglichkeiten und Grenzen des Virtual Lab, des telemedizinischen Ansatzes, sowie der damit entwickelten akustischen Biofeedback-Therapie in Kapitel 7 diskutiert. Die Arbeit schließt mit der Zusammenfassung, einigen Schlussfolgerungen sowie einem Ausblick auf zukünftige Potentiale und Entwicklungen.

8.2 Schlussfolgerungen

- Telemedizinische Systeme werden zukünftig einen wichtigen Bestandteil in der Gesundheitsversorgung darstellen. Steigende Kosten und zunehmende Patientenzahlen, bei einer nicht ausreichenden Verfügbarkeit von Ärzten und Pflegepersonal, machen den Einsatz von derartigen Behandlungskonzepten und Technologien zwingend erforderlich.
- Eine intuitive, komfortable und interaktive Bedienung mit einem Minimum an notwendigen Aktionen an den Mess- und Endgeräten ist Voraussetzung für eine hohe Akzeptanz und Nutzung. Ein einfaches Bedienkonzept sollte konsequent und durchgängig umgesetzt werden.
- Remote Services sind notwendig. Ohne Fernzugriff sind die Telemedizin-Systeme nicht marktfähig betreibbar.
- Zielgerichtetes Feedback ist aus Gründen der medizinischen Wirksamkeit, des Komforts und für den therapeutischen Erfolg absolut notwendig. Viele Patienten können ihre therapeutischen Fortschritte als solche nicht erkennen oder nicht einschätzen. Ohne eine entsprechende Rückmeldung würden Erfolgserlebnisse völlig fehlen und schlimmstenfalls zu einem Therapieabbruch führen.
- Individualisierung und Personalisierung ist ebenfalls notwendig, um therapeutisches Gelingen, eine hohe Nutzerfreundlichkeit und Akzeptanz sowie persönliche Motivation herzustellen. Gerade die weichen Faktoren der Krankheitsursachen können damit beeinflusst werden.
- Interaktion zwischen Telemedizin-Center und Patient ist die Voraussetzung, um fortgeschrittene medizinische Dienste anbieten zu können. Nur dann können Rückfragen gestellt werden und mithilfe eines Expertensystems Entscheidungsgrundlagen für Diagnostik und Therapie erstellt werden.

8.3 Ausblick

Das Potential und die Weiterentwicklung des in diesem Projekt realisierten Virtual Lab mit den damit gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnissen soll in mehreren Szenarien aufgezeigt werden.

Die Zukunft liegt eindeutig in personalisierten, individualisierten Assistenzsystemen mit einem dahinterliegenden Expertensystem basierend auf einer semantischen Datenbank, technischen wie medizinischen Diensten inklusive Context Awareness und einer durchgehenden Interoperabilität. Darum liegt der nächstliegende Schritt genau in dem Aufbau und Betrieb eines solchen Systems.

8.3.1 COMES[®]

COMES^{®1} steht für COgnitive ME dizinische Systeme und ist eine mobile Diagnose- und Therapieplattform auf Basis solch eines umfassenden telemedizinischen Assistenzsystems.

Die vom Patienten in authentischer Umgebung mit einem sensorgestützten, mobilen Messgerät selbst erhobenen Daten werden per Bluetooth automatisch zu einem mobilen Endgerät und von dort direkt in die COMES-Datenbank (SOAP) sicher übertragen. Anschließend werden die hinterlegten Daten mit der COMES[®]-Expertensoftware und einem intelligenten Feedback- und Interventionsmanagement verknüpft. Je nach Indikation können nutzerspezifische Grenzwerte festgelegt werden, bei deren Über- oder Unterschreitung definierbare Aktionen wie ein Anruf oder eine Benachrichtigung von Patient und/oder Arzt erfolgt, siehe Abbildung 8.1.

Das COMES[®]- Expertensystem analysiert, regelt und steuert das individuelle Feedback durch intelligente, kontextabhängige und dialogorientierte Algorithmen und Prozesse. Ausgangsbasis sind die regelmäßig erhobenen biomedizinischen Werte im Abgleich mit externen medizinischen Wissensdatenbanken. So sind im Bedarfsfall auf den Nutzer zugeschnittene ganz zielgerichtete Interventionen möglich. Dies kann beispielsweise nur eine im Telefongespräch übermittelte Information, eine Handlungsempfehlung als Textnachricht oder die Übertragung codierter und verschlüsselter Steuersignale an medizinische Akteure sein, die bestimmte Therapiemaßnahmen telematisch initiieren und steuern, siehe Abbildung 8.2.

¹ COMES ist eine eingetragene Marke des Heinz Nixdorf-Lehrstuhls für Medizinische Elektronik

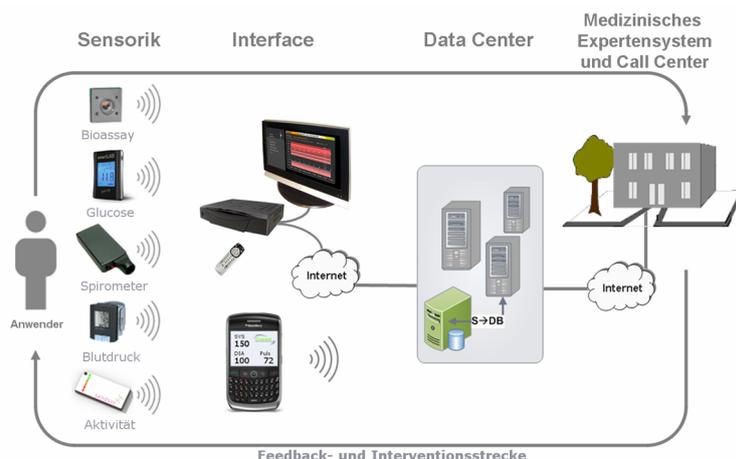


Abb. 8.1: Das COMES® Gesamtkonzept: Cognitive Medizinische Systeme als intelligentes telemedizinisches Assistenzsystem begleiten den Nutzer in allen Lebenslagen und zu jedem Ort.

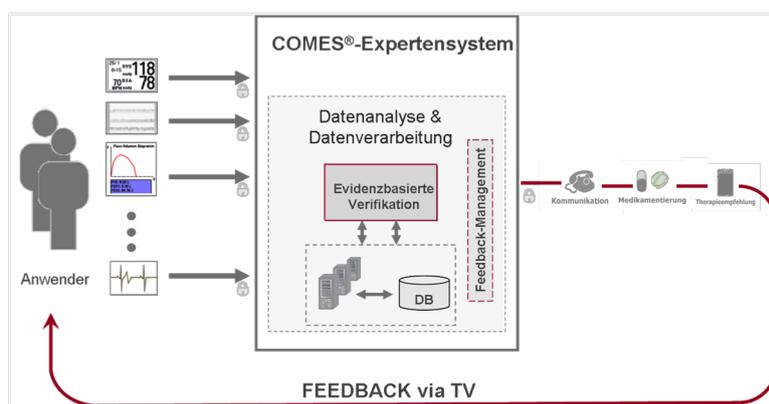


Abb. 8.2: Das COMES® Expertensystem

Die Ausweitung auf die aktuellsten Multimedia-Endgeräte wie den BlackBerry oder das iPhone sind sinnvoll, da die serverbasierte BlackBerry-Lösung speziell auf Push-Mails und Remote Services konzipiert ist. Das iPhone bietet sich aufgrund der sehr ausgereiften Touch Screen Technologie, sowie der sehr intuitiven Bedienung an. Es ist auf die intensive Nutzung von Multimedia-Inhalten via Internetzugang ausgelegt und bewältigt diese Anforderungen hervorragend. Das unüberschaubare Angebot der verfügbaren additiven Applikationen (Apps) bestätigt dies. Viele Anwender, die zuvor gar kein Handy verwendet haben, nutzen das iPhone. Dessen Marktakzeptanz ist überdurchschnittlich gut. Dadurch entsteht eine breite Basis potentieller Anwender für die COMES®-Dienste.

Als stationäre Lösung für zu Hause bietet sich die Kombination aus SetTop Box und TV-Gerät an. Die SetTop Box kann über einen Netzwerkanschluss mit dem COMES[®]-Expertensystem verbunden werden und somit können sämtliche Inhalte, Datenverläufe, Zusatzinformationen und Feedback-Meldungen auf dem TV-Gerät sehr komfortabel angezeigt werden. Mit diesem Endgerät sind viele weitere therapeutische Anwendungen, angelehnt an Fitness-Spiele oder klassische Biofeedback-Anwendungen, möglich.

Der Zugriff auf medizinische Informationsportale über die mobile oder stationäre Lösungsvariante steigert die Bedeutung als Selbstinformationssystem. Exemplarisch dafür ist in Abbildung 8.3 die Sequenz eines Informationsfilms über das Virtual Lab auf einem Smart Phone dargestellt.

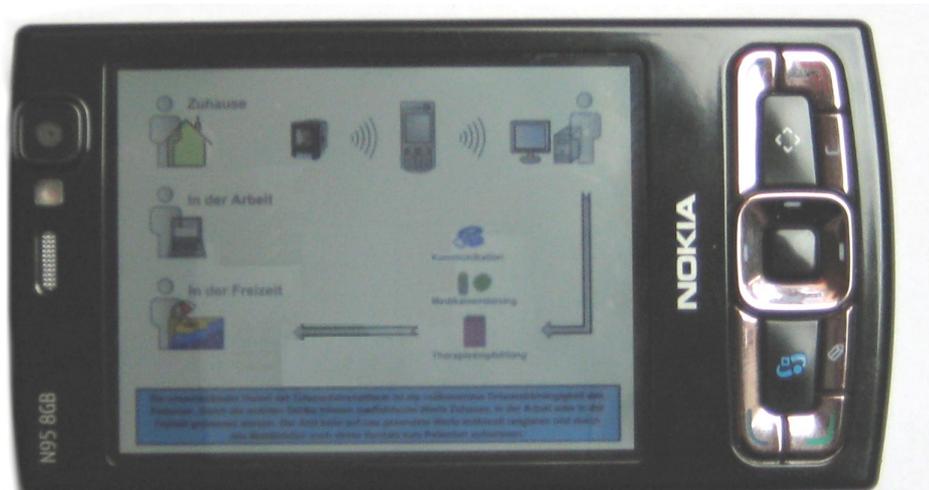


Abb. 8.3: Beispiel eines Info-Films auf einem Smart Phone

8.3.2 Ton und Tonus

Die sehr guten Resultate mit den akustischen Interventionen bei arterieller Hypertonie, dem Wissen aus der Musikwirkungsforschung und den vielseitigen bekannten Anwendungen aus der Musik Medizin und Musiktherapie ermutigen dazu, das therapeutische Potential von Musik für physikalische und nicht medikamentöse Therapien verstärkt zu nutzen und weitere wissenschaftliche Untersuchungen durchzuführen.

Ausgehend von der gelungenen Identifizierung der musikalischen blutdrucksenkenden Wirkbestandteile liegt nun der Transfer auf weitere Indikationen nahe. Dazu müssten

auf das jeweilige Krankheitsbild abgestimmt neue akustische Interventionssequenzen generiert werden. Denkbar ist der Einsatz von Musik bei Migräne, Depression, Demenz, Alzheimer, Parkinson, Borderline, Schlaganfall, Atemwegserkrankungen und vielen weiteren Erkrankungen. Prinzipiell sind alle Krankheitsbilder geeignet, die vorwiegend von zentralnervösen und psychosomatischen Störungen verursacht werden. Auch bei Suchtbehandlungen verschiedenster Art, beispielsweise bei Essstörungen, Nikotinabusus, Drogenkonsum ist der Einsatz von Musik als adjunkte Therapie denkbar, insbesondere in Kombination mit dem COMES[®]-System. Diabetes mellitus wäre ein wünschenswertes Anwendungsgebiet. Da hier die eingeschränkte Insulinproduktion pankreasabhängig ist, dürfte ein Erfolg jedoch sehr fraglich sein.

Eine weitere sehr sinnvolle Applikation wäre eine virtuelle Schmerztherapie, da Musik nachweislich auch schmerzlindernd wirkt [182]. Je nach Schmerzprofil (entsprechend einer Skalenbewertung) würde die passende, individuelle Musik vom Expertensystem situations- und zeitgerecht zur Linderung der Schmerzen und den damit verbundenen Nebeneffekten eingespielt.

Das Gebiet der Biofeedback-Therapien ist ebenfalls ein interessantes Feld für den Einsatz akustischer Sequenzen. Dort werden elektrophysiologische Parameter sensorisch kontinuierlich erfasst, die Rückschlüsse auf das vegetative Nervensystem und die kardiovaskuläre Balance zulassen. Die meisten Anwendungen werden fast ausschließlich in psychotherapeutischen Praxen durchgeführt und sind darüber hinaus kabelgebunden. Die in diesem Bereich eingesetzte Sensorik und Software kommt unserer Zielsetzung relativ nahe, da sie visuelles und auditives Feedback einbindet und ein breites Angebot animierter Spiele für therapeutische Zwecke existieren. Allerdings ist weder die Sensorik noch die Software für den Eigengebrauch im heimischen Umfeld geeignet und verwendbar.

Musik und Biofeedback kann wechselseitige Funktionen übernehmen:

- individuelle Klangsequenzen oder Musik als Pacer statt der bisher synthetisch generierten sehr einfach strukturierten Töne in den bestehenden therapeutischen Biofeedback-Applikationen,
- kontinuierliche Biofeedback-Aufnahmen als Analysetool zur Optimierung der akustischen Interventionssequenzen mittels einer Korrelationsanalyse zwischen den Parametern wie der Atemrate, Herzfrequenz, dem Hautwiderstand oder

Blutvolumen-Puls und der Musik, sowie die Bestimmung der dazugehörigen Herzratenvariabilität.

Algorithmen zur Gestaltung personalisierter und individualisierter Angebote sind beispielsweise von dem Online-Händler Amazon oder dem Internet-Radioanbieter Last.fm bekannt. Es gibt noch keinerlei Applikationen dieser Art auf dem Fitness-, Wellness- oder Gesundheitsmarkt. Auf solchen Information-Retrieval-Verfahren aufsetzend, ist die Realisierung eines individualisierten Feedbacks inkl. personalisierter Interventionsangebote sehr gut möglich. Damit wäre eine sehr wichtige Voraussetzung für den Therapieerfolg gesetzt, eine sehr gute Compliance aufgrund einer hohen intrinsischen Motivation, die durch die aktive Mitwirkung erzeugt wird.

Aus technischer Sicht entstehen ebenfalls vielversprechende neue Möglichkeiten in Kombination mit Musik. Werden alle neuen Medien geschickt kombiniert, sind folgende Angebote möglich:

- Die mobilen Endgeräte oder die stationäre SetTop Box können gleichzeitig Empfangs- und Anzeigeeinheiten und interaktive Kommunikationszentrale sein,
- Streaming-Lösungen individueller Audio- oder Videoangebote, gesteuert von dem Expertensystem,
- eine musikalische Apotheke in Form eines Internet-Portals mit entsprechenden Downloadmöglichkeiten,
- spezielle Formate oder Spartensender für therapeutische Musik über die Medien Radio, TV oder Internet.

8.3.3 Virtual Reality

Ein wissenschaftlich höchst interessanter und vielversprechender Forschungsansatz zielt auf die Erweiterung der Ambient Medicine[®] Plattform um weitere Modalitäten ab. In Kombination mit den bestehenden Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Virtual Reality können neue Dimensionen therapeutischer Anwendungen geschaffen werden, die alle Sinne integrieren.

Sinneskanäle sind beliebig einsetzbar, um physiologische oder Stoffwechselfvorgänge zu modulieren. Ein wichtiger Ansatzpunkt ist hierbei die Nutzung der intrinsischen

Bioelektrizität. Die Mobilisierung von Patienten führt zu zunächst ungerichteten Ereignismustern und deren Abbildung im zerebralen Bereich. Da das Gehirn seinerseits aber auch als große globale Drüse betrachtet werden kann, können auch unspezifische Muster zu einer globalen physiologischen Aktivierung führen.

Neben dem auditiven sind dies vor allem der visuelle, haptische und olfaktorische Sinneskanal. Zu allen dieser potenziellen Stimulanzen existieren bereits erste Therapiekonzepte [198, 98, 84]. Als Ausgangsbasis können die Erkenntnisse aus der Gestaltung der akustischen Biofeedback-Therapie dienen.

Bisher wurden vorrangig die visuellen Eindrücke in der virtuellen Realität weitreichend umgesetzt, was im Gaming-Bereich besonders gut zu beobachten ist. Im Bereich der Akustik etablieren sich gegenwärtig zunehmend Forschergruppen, die die auditive Wahrnehmung in die Virtual Reality zu integrieren versuchen [197, 25]. Die Zusammenführung der ausgereiften Methoden in der Raumakustik (Auralisation), der Psychoakustik und der Multimediatechnik hat bisher sehr vielversprechende Resultate hervorgebracht.

Unter Beteiligung aller Sinne können die unterschiedlichsten Lebensräume sehr realitätsnah und authentisch nachgebildet werden. So entstünden virtuelle Therapieräume, die besonders für alle psychologisch und kognitiv geprägten Therapeuten interessant wären. Anwendungsgebiete sind teilweise schon heute die Behandlung von Phobien oder Ängsten aller Art z. B. Spinnenphobie oder Flugangst.

In Verbindung mit dem sensorgestützten Telemonitoring können vielfältigste Fragestellungen in unterschiedlichsten Umgebungsbedingungen virtuell untersucht werden.

8.3.4 Zukunftspotential

Die aktuellen Forschungstrends in der Medizintechnik vereinen die Gebiete Mikrosystemtechnik, Kognitionsforschung und die Informations- und Kommunikationstechnik. Die Smart Systems, RFID, intelligenten Implantate und assistiven Systeme kommen aus der Mikrosystemtechnik. Die Robotik, Neuroprothetik bis zu den Brain Computer Interfaces führen in die Kognitionsforschung. Und die infrastrukturelle Basis für beispielsweise das Internet der Dinge oder die Social Communities legen die neuesten Multimedia- und Netzwerktechnologien.

Das Spektrum beispielhafter Entwicklungen reicht von einem telemedizinfähigen Spirometer gekoppelt mit einem dazugehörigen Aerosoldosiersystem [119], vernetzten Aktivitätssensoren [10], dem Senso Bite[®] System² – eine intelligente Zahnschiene für Bruxismus-Patienten [39], einem Sensor zur Diagnostik und Therapie von atembezogenen Schlafstörungen [93] bis hin zu intelligenten Implantaten [129] und dem μ -LA – ein portables, miniaturisiertes Labor geeignet zur biochemischen Flüssigkeitsanalyse [169]. Diese Produkte sind ausnahmslos am Heinz Nixdorf-Lehrstuhl für Medizinische Elektronik in Zusammenarbeit mit dem angegliederten Innovationszentrum für Medizinelektronik entstanden.

All diese zukunftssträchtigen Innovationen können in die Ambient Medicine[®] Plattform und in das Virtual Lab-Konzept eingebunden werden.

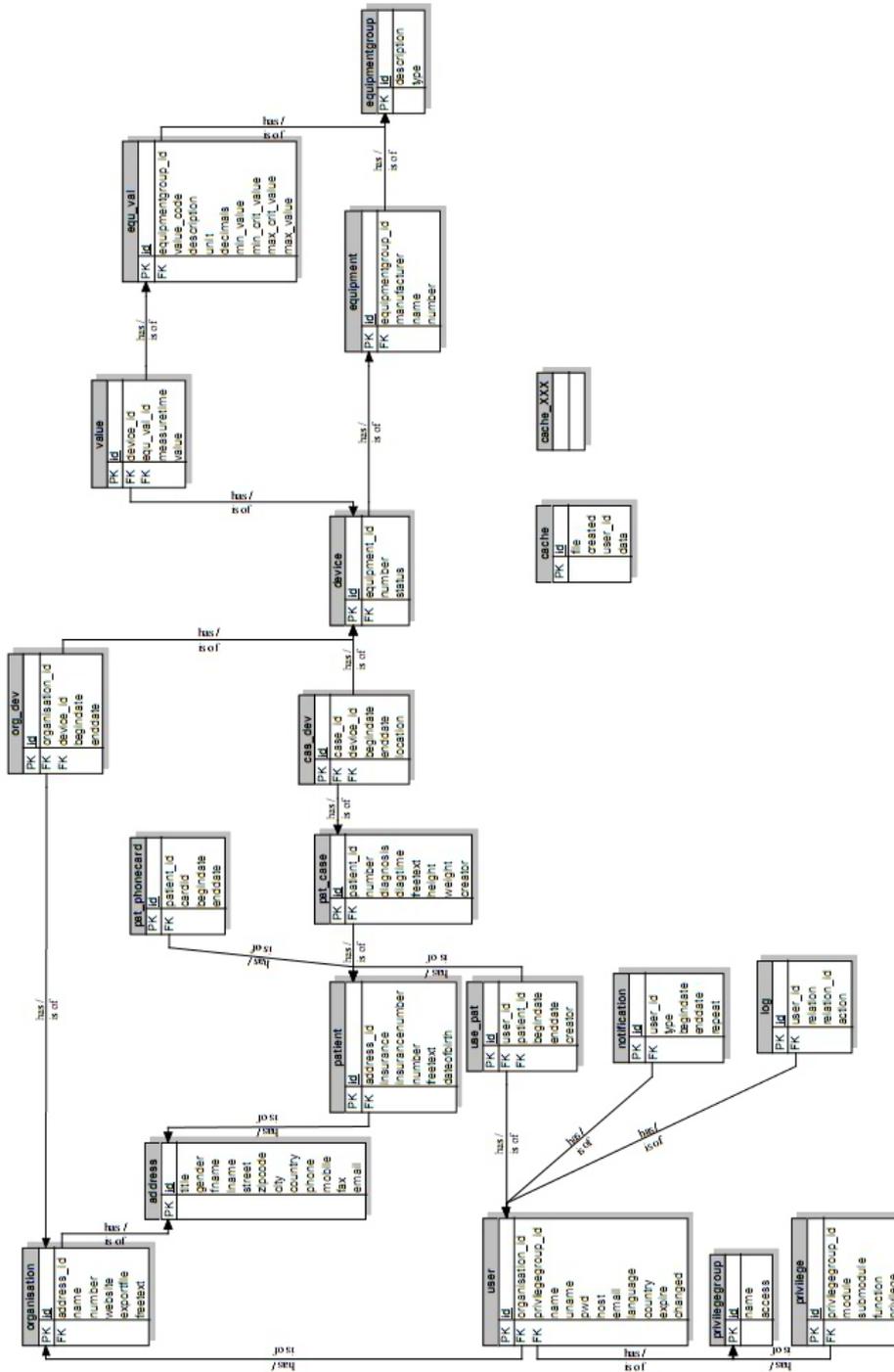
Der moderne Mensch als mündiger Patient möchte bei Behandlungskonzepten mitsprechen und mitentscheiden. Voraussetzung dafür ist Wissen und Verständnis beim Patienten, welches er durch den behandelnden Arzt erhalten kann oder alternativ durch objektive, neutrale und unabhängige Informationssysteme. Diese Informationen sollten frei von Interessen Einzelner, Firmen oder Institutionen sein.

² Senso Bite ist eingetragenes Warenzeichen der Sense Inside GmbH, München

ANHANG

A Originaldaten

A.1 Relationales Datenbankmodell der SynergyCare Datenbank



A.2 Fragebogen



Fragebogen zur Evaluierung des Blutdruckmesskits und dem Versuch „Blutdruck senken mit Musik“

Sehr geehrte Teilnehmer,

vielen Dank für Ihre Teilnahme an dem Versuch. Zur ganzheitlichen Auswertung der Versuche möchten wir Sie bitten noch folgende Fragen zu beantworten. Die Daten des Fragebogens werden anonymisiert und streng vertraulich behandelt.

Bitte benutzen Sie einfach die Rückseite, wenn der Platz nicht ausreicht. Vielen Dank!

Heutiges Datum:

Alter: Jahre

Geschlecht: m w

Aufenthaltsdauer Klinik: Wochen

1. Was hat Sie dazu bewogen bei diesem Versuch teilzunehmen?

.....
.....

2. Wie beurteilen Sie persönlich die Auswirkung des Musikstückes auf Ihren Blutdruck und Ihr allgemeines Wohlbefinden?

.....
.....
.....
.....

3. Wie sind Sie mit dem Blutdruckmessgerät zufrieden?

Vergeben Sie Noten von 1 - 6:

Ich bin sehr zufrieden = 1

Ich bin überhaupt nicht zufrieden = 6

1 2 3 4 5 6

4. Wie bewerten Sie die Bedienbarkeit des Blutdruckmessgerätes?

Vergeben Sie Noten von 1 - 6:

Die Bedienung ist sehr einfach = 1
 Die Bedienung ist sehr schwierig = 6

1 2 3 4 5 6

5. Vertrauen Sie den Messergebnissen?

Ja Nein, weil

.....

6. Wie sind Sie mit dem zum Messkit zugehörigen Handy zufrieden?

Vergeben Sie Noten von 1 - 6:

Ich bin sehr zufrieden = 1
 Ich bin überhaupt nicht zufrieden = 6

1 2 3 4 5 6

7. Wie bewerten Sie die Bedienbarkeit des Handys?

Vergeben Sie Noten von 1 - 6:

Die Bedienung ist sehr einfach = 1
 Die Bedienung ist sehr schwierig = 6

1 2 3 4 5 6

8. Weil ich jederzeit selbst in einer mir vertrauten Umgebung den Blutdruck messen kann, entsprechen meine Blutdruckwerte eher der Wirklichkeit:

Stimmt Stimmt nicht

9. Wie bewerten Sie die Zweckmäßigkeit derartiger Systeme, wie das von Ihnen verwendete Blutdruckmesskit, bei denen der Patient selbst aktiv seine Therapie durchführen muss?

Vergeben Sie Noten von 1 - 6:

Derartige Systeme sind sehr sinnvoll = 1
 Derartige Systeme sind überhaupt nicht sinnvoll = 6

1 2 3 4 5 6

10. Welche Musikstück(e) haben Sie sich angehört? Bitte geben Sie den Zeitraum an.

1. Zeitraum:

2. Zeitraum:

11. Wie gefiel Ihnen das Musikstück?

Vergeben Sie Noten von 1 - 6:

Das Musikstück gefiel mir sehr = 1

Das Musikstück gefiel mir überhaupt nicht = 6

1 2 3 4 5 6

12. Wie stehen Sie normalerweise zu klassischer Musik?

Vergeben Sie Noten von 1 - 6:

Ich mag klassische Musik sehr = 1

Ich mag klassische Musik überhaupt nicht = 6

1 2 3 4 5 6

13. Falls Sie die letzte Frage mit einer Note von „4“ oder schlechter beantwortet haben: Wie schwer fiel es Ihnen sich trotzdem klassische Musik anzuhören?

Vergeben Sie Noten von 1 - 6:

Mir viel es überhaupt nicht schwer = 1

Mir viel es sehr schwer = 6

1 2 3 4 5 6

14. War es für Sie schwierig bzw. anstrengend die geforderte Prozedur täglich mehrmals eigenständig durchzuführen?

Ja Nein

15. Wie oft brachen Sie, aus diversen Gründen, das Anhören der Musik frühzeitig ab?

Sehr oft Weniger oft Selten/Nie

Gründe:

.....

16. Würde es Sie stören wenn das vollständige Anhören der richtigen Musikstücke, z.B. durch die Handysoftware, kontrolliert wird?

Ja Nein

17. Hätten Sie sich eine größere Auswahl an Musikstücken gewünscht?

Ja Nein

18. Wurde es für Sie ermüdend das ausgewählte Musikstück täglich zu hören?

Ja Nein

19. Wenn Sie die letzte Frage mit „Ja“ beantwortet haben: Nach wie viel maligem Hören trat dieser Effekt auf?

- Nach etwa 5x Nach etwa 10x Nach deutlich mehr als 10x

20. Welche Länge eines Musikstückes (in Minuten) ist für Sie bei mehrwöchigen, täglichen Gebrauch noch akzeptabel?

- bis zu 3min zwischen 3 und 5min über 5min

21. Würden Sie sich eine Erinnerungsfunktion wünschen, die Sie an das Durchführen der Messungen erinnert?

- Ja Nein

22. Wenn Sie die letzte Frage mit „Ja“ beantwortet haben: Würden Sie sich durch automatisierte Anrufe gestört fühlen, bei denen eine Tonbandansage Sie an das Durchführen der Messungen erinnert?

- Ja Nein

23. Wie oft traten Störungen auf, z.B. keine korrekte Übertragung von Messwerten?

- Sehr oft Weniger oft Selten/Nie

Störungen:
.....
.....
.....

24. Welche Verbesserungen bzw. Erweiterungen würden Sie sich wünschen um individueller auf die Bedürfnisse verschiedener Patienten eingehen zu können?

.....
.....
.....
.....

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

B Musikauswahl

B.1 Ergotrope Musik

Komponist	Werk	Teilstück	Jahr	Besetzung
Barock				
J.S. Bach	2. Brandenburgisches Konzert, BWV 1047	1. Satz	1721	Orchester
A. Vivaldi	12 Violinkonzerte op. 8	La Primavera	1725	Violine, Orchester
A. Vivaldi	13 Violinkonzerte op. 8	L'Estate	1725	Violine, Orchester
A. Vivaldi	14 Violinkonzerte op. 8	L'Autunno	1725	Violine, Orchester
A. Vivaldi	15 Violinkonzerte op. 8	L'Inverno	1725	Violine, Orchester
Klassik				
W.A. Mozart	21. Klavierkonzert C-Dur (KV 467)	Allegro	1785	Klavier, Orchester
L.v. Beethoven	Violinkonzert	Rondo (Allegro)	1806	Violine, Orchester
L.v. Beethoven	5. Sinfonie	Allegro con brio	1808	Orchester
L.v. Beethoven	5. Sinfonie	Allegro	1808	Orchester
L.v. Beethoven	5. Klavierkonzert	Allegro	1809	Klavier, Orchester
L.v. Beethoven	5. Klavierkonzert	Rondo, Allegro	1809	Klavier, Orchester
Romantik				
J. Strauß	Radetzky Marsch		1848	Bläser
G. Meyerbeer	Le Prophete	Krönungsmarsch	1849	Blechbläser
F. Liszt	1. Klavierkonzert Es-Dur	Allegro maestoso	1855	Klavier, Orchester
J. Brahms	Violinkonzert	Allegro giocoso	1879	Violine, Orchester
J. Brahms	4. Sinfonie	Allegro giocoso	1886	Orchester
J. Brahms	4. Sinfonie	Allegro energico e passionato	1886	Orchester
A. Dvořák	Slavische Tänze op. 46	Nr. 1 (Presto)	1878	Orchester
A. Dvořák	Slavische Tänze op. 46	Nr. 8 (Presto)	1878	Orchester

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Komponist	Werk	Teilstück	Jahr	Besetzung
A. Dvořák	Slavische Tänze op. 72	Nr. 1 (Allegro vivace)	1886	Klavier
A. Dvořák	Karneval-Ouvertüre op. 92		1891	Orchester
C.d. Saint-Sæns	Karneval der Tiere	Finale	1886	Klavier, Orchester
C.d. Saint-Sæns	Karneval der Tiere	Die Fossilien	1886	Xylophon, Klavie- re, Streicher
Spätromantik				
R. Strauss	Don Juan		1889	Orchester
I.F. Strawinski	Feuervogel	Höllentanz des Königs Kaschtschei	1910	Orchester
I.F. Strawinski	Le Sacre du Printemps	Verherrlichung der Auserwählten	1913	Orchester
D.B. Kabalewski	Komödianten-Suite	Epilog	1940	Orchester
D.B. Kabalewski	Komödianten-Suite	Galopp	1940	Orchester
A. Khachaturian	Gayane Suite	Säbeltanz	1943	Orchester
A. Khachaturian	Masquerade Suite	Galopp	1943	Orchester
A. Khachaturian	Spartakus	Tanz der Piraten	1956	Orchester
Sonstige Werke				
K. Badelt	Pirates of the Caribbean	Barbossa is Hungry	2003	Orchester
K. Badelt	Pirates of the Caribbean	To the Pirates Cave	2003	Orchester
K. Badelt	Pirates of the Caribbean	Will and Elizabeth	2003	Orchester

B.2 Trophotrope Musik

Komponist	Werk	Teilstück	Jahr	Besetzung
Barock				
J. Pachelbel	Kanon und Gigue in D-Dur	Kanon	~1680	Streicher, Cembalo
J.S. Bach	Doppelkonzert für zwei Violinen, BWV 1043	Adagio	1713-1730	Violinen, Orchester
J.S. Bach	Sonate für Flöte u. Basso continuo	Adagio ma non tanto	1717-1724	Flöte, Cembalo
J.S. Bach	3. Orchestersuite, BWV 1068	Air, Version 1	um 1723	Streicher, Cembalo

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Komponist	Werk	Teilstück	Jahr	Besetzung
J.S. Bach	3. Orchestersuite, BWV 1068	Air, Version 1	um 1723	Streicher, Cembalo
J.S. Bach	3. Orchestersuite, BWV 1068	Air, Schleife	um 1723	Streicher, Cembalo
G.F. Händel	Harfenkonzert	Larghetto	1736	Harfe, Orchester
G.F. Händel	Berenice	Menuett	1737	Blechbläser
Klassik				
W.A. Mozart	21. Klavierkonzert (KV 467)	Andante	1785	Klavier, Orchester
W.A. Mozart	21. Klavierkonzert (KV 467)	Andante, Schleife	1785	Klavier, Orchester
W.A. Mozart	Ave verum corpus (KV 618)		1791	Chor, Streicher, Orgel
L.v. Beethoven	14. Klaviersonate	Adagio sostenuto, Version 1	1801	Klavier
L.v. Beethoven	14. Klaviersonate	Adagio sostenuto, Version 2	1801	Orchester
L.v. Beethoven	3. Klavierkonzert	Largo	1803	Klavier, Orchester
L.v. Beethoven	6. Sinfonie	Andante molto mosso	1808	Orgel
L.v. Beethoven	5. Klavierkonzert	Adagio un poco mosso	1809	Klavier, Orchester
Romantik				
F. Schubert	Fräulein vom See	Ave Maria (nach Ellens drit. Gesang)	1825	Cello, Klavier
F. Mendelssohn-Bartholdy	1. Klavierkonzert	Andante	1831	Klavier, Orchester
J. Brahms	Choralvorspiel und Fuge WoO 7	O Traurigkeit, o Herzeleid	1856	Orgel
J. Brahms	3. Sinfonie	Poco allegretto	1883	Orchester
J. Brahms	11 Choralvorspiele op. 122 (posth.)	Herzliebster Jesu	1896	Orgel
A. Dvořák	Romanze für Violine		1873	Violine, Orchester
C.d. Saint-Sæens	Karneval der Tiere	Der Schwan	1886	Cello, Klavier
E. Grieg	Peet-Gynt-Suite 2	Solvejgs Lied	1891	Orchester
Spätromantik				
C. Debussy	Suite bergamasque	Clair de lune	1890	Harfe
E. Satie	3 Gymnopédies	Lent et grave	1888	Klavier
E. Satie	3 Gnossiennes	Lent	1890	Klavier
E. Satie	3 Gnossiennes	Avec étonnement	1890	Klavier
E. Satie	3 Gnossiennes	Lent	1890	Klavier

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Komponist	Werk	Teilstück	Jahr	Besetzung
E. Satie	4eme Gnossiennes	Lent	1891	Klavier
G. Mahler	5. Sinfonie	Adagietto	1904	Orchester
S. Barber	Adagio for strings		1938	Streicher
A. Khachaturian	Spartakus	Adagio von Spartacus und Phrygia	1956	Orchester
Sonstige Werke				
Traditionell	Wiegelied	Guter Mond du gehst so stille	um 1780	Gesang, Streicher

C Musikalische Merkmale

C.1 Psychoakustische Merkmale

Merkmall	Wilks' Lambda Λ	Irrtumswahrscheinl. p	Signif.	Neu
Lautheit				
Lautheit	0,848	0,001	X	X
Lautheit_Std	0,917	0,017	X	X
Lautheit_Max	0,929	0,028	X	X
Lautheit_Min	0,977	0,213		X
max_N_kurtosis	0,995	0,579		
mean_N_kurtosis	0,915	0,016	X	
max_N_peak	0,876	0,003	X	
mean_N_peak	0,839	0,001	X	
max_N_skewness	0,997	0,647		
mean_N_skewness	0,918	0,018	X	
min_N_skewness	0,998	0,742		
sumofdifs_N_mean	0,990	0,411		
max_N_mean	0,949	0,063		
mean_N_mean	0,906	0,011	X	
std_N_mean	0,948	0,062		
max_N_range	0,832	0,001	X	
mean_N_range	0,814	0,000	X	
std_N_range	0,868	0,002	X	
mean_N_std	0,870	0,003	X	
mean_N_maxdiff	0,879	0,004	X	
max_N_maxdiff	0,926	0,025	X	
range_N_maxdiff	0,961	0,108		

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Merkmal2	Wilks' Lambda Λ	Irrtumswahrscheinl. p	Signif.	Neu
Loudness Spread				
Loudness_Spread	0,989	0,393		X
Loudness_Spread_Std	1,000	0,986		X
Loudness_Spread_Max	0,973	0,177		X
Loudness_Spread_Min	0,992	0,475		X
Schärfe				
Schaerfe	0,701	0,000	X	X
Schaerfe_Std	0,991	0,440		X
Schaerfe_Max	0,846	0,001	X	X
Schaerfe_Min	0,838	0,001	X	X
max_sharp_peak	0,753	0,000	X	
mean_sharp_peak	0,635	0,000	X	
max_sharp_range	0,911	0,014	X	
mean_sharp_range	0,778	0,000	X	
max_sharp_mean	0,693	0,000	X	
std_sharp_mean	0,947	0,060		
mean_sharp_mean	0,646	0,000	X	
sumofdifs_sharp_mean	1,000	0,908		
max_sharp_kurtosis	0,969	0,149		
mean_sharp_kurtosis	0,959	0,099		
mean_sharp_std	0,782	0,000	X	
mean_sharp_skewness	0,971	0,167		
MFCC				
MFCC_Mean1	0,669	0,000	X	X
MFCC_Mean2	0,693	0,000	X	X
MFCC_Mean3	0,939	0,042	X	X
MFCC_Mean4	0,903	0,010	X	X
MFCC_Mean5	0,995	0,573		X
MFCC_Mean6	0,976	0,205		X
MFCC_Mean7	1,000	0,888		X
MFCC_Mean8	0,965	0,125		X
MFCC_Mean9	0,978	0,224		X
MFCC_Mean10	0,829	0,000	X	X
MFCC_Mean11	0,996	0,596		X
MFCC_Mean12	0,940	0,045	X	X
MFCC_Mean13	0,985	0,317		X

Fortsetzung auf der nächsten Seite

C – MUSIKALISCHE MERKMALE

Merkmals2	Wilks' Lambda Λ	Irrtumswahrscheinl. p	Signif.	Neu
MFCC_Max1	0,564	0,000	X	X
MFCC_Max2	0,881	0,004	X	X
MFCC_Max3	0,945	0,055		X
MFCC_Max4	0,934	0,034	X	X
MFCC_Max5	0,968	0,146		X
MFCC_Max6	0,997	0,667		X
MFCC_Max7	0,998	0,688		X
MFCC_Max8	0,990	0,416		X
MFCC_Max9	1,000	0,964		X
MFCC_Max10	0,982	0,274		X
MFCC_Max11	0,990	0,418		X
MFCC_Max12	0,966	0,135		X
MFCC_Max13	0,984	0,301		X
MFCC_Min1	0,977	0,220		X
MFCC_Min2	0,728	0,000	X	X
MFCC_Min3	0,996	0,629		X
MFCC_Min4	1,000	0,887		X
MFCC_Min5	0,967	0,135		X
MFCC_Min6	0,980	0,252		X
MFCC_Min7	0,979	0,240		X
MFCC_Min8	1,000	0,984		X
MFCC_Min9	0,998	0,748		X
MFCC_Min10	0,978	0,230		X
MFCC_Min11	0,951	0,069		X
MFCC_Min12	0,977	0,221		X
MFCC_Min13	0,999	0,811		X
MFCC_Std1	0,959	0,098		X
MFCC_Std2	0,931	0,031	X	X
MFCC_Std3	0,876	0,003	X	X
MFCC_Std4	0,987	0,352		X
MFCC_Std5	0,930	0,029	X	X
MFCC_Std6	1,000	0,860		X
MFCC_Std7	0,997	0,638		X
MFCC_Std8	0,995	0,584		X
MFCC_Std9	0,992	0,481		X
MFCC_Std10	0,993	0,484		X

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Merkmal2	Wilks' Lambda Λ	Irrtumswahrscheinl. p	Signif.	Neu
MFCC_Std11	0,969	0,154		X
MFCC_Std12	0,945	0,054		X
MFCC_Std13	0,920	0,019	X	X

C.2 Dynamische Merkmale

Merkmal	Wilks' Lambda Λ	Irrtumswahrscheinl. p	Signif.	Neu
Dynamik der zeitlichen Hüllkurve				
Huellkurve_Var	0,761	0,000	X	X
Huellkurve_Var_Std	0,827	0,000	X	X
Huellkurve_Var_Max	0,853	0,001	X	X
Huellkurve_Var_Min	0,960	0,102		X
Dynamik der Lautheit				
Rel.Lautheits_Std1	0,808	0,000	X	X
Rel.Lautheits_Std1_Std	0,978	0,230		X
Rel.Lautheits_Std1_Max	0,947	0,060		X
Rel.Lautheits_Std1_Min	0,806	0,000	X	X
Rel.Lautheits_Std2	0,450	0,000	X	X
Rel.Lautheits_Std2_Std	0,872	0,003	X	X
Rel.Lautheits_Std2_Max	0,777	0,000	X	X
Rel.Lautheits_Std2_Min	0,710	0,000	X	X
Var_Lautheit1	0,504	0,000	X	X
Var_Lautheit1_Std	0,870	0,003	X	X
Var_Lautheit1_Max	0,913	0,014	X	X
Var_Lautheit1_Min	0,670	0,000	X	X
Var_Lautheit2	0,560	0,000	X	X
Var_Lautheit2_Std	0,841	0,001	X	X
Var_Lautheit2_Max	0,785	0,000	X	X
Var_Lautheit2_Min	0,832	0,001	X	X
Spectral Flux				
Spectral_Flux	0,425	0,000	X	X

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Merkmal	Wilks' Lambda Λ	Irrtumswahrscheinl. p	Signif.	Neu
Spectral_Flux_Std	0,837	0,001	X	X
Spectral_Flux_Max	0,633	0,000	X	X
Spectral_Flux_Min	0,613	0,000	X	X
Delta Spectrum Magnitude				
Delta_Spectrum_Magnitude	0,666	0,000	X	X
Delta_Spectrum_Magnitude_Std	0,670	0,000	X	X
Delta_Spectrum_Magnitude_Max	0,645	0,000	X	X
Delta_Spectrum_Magnitude_Min	0,922	0,021	X	X
Delta_Spectrum_Magnitude2	0,647	0,000	X	X
Delta-MFCC und Delta-Delta-MFCC				
MFCC_Delta1	0,474	0,000	X	X
MFCC_Delta2	0,629	0,000	X	X
MFCC_Delta3	0,564	0,000	X	X
MFCC_Delta4	0,569	0,000	X	X
MFCC_Delta5	0,550	0,000	X	X
MFCC_Delta6	0,518	0,000	X	X
MFCC_Delta7	0,548	0,000	X	X
MFCC_Delta8	0,514	0,000	X	X
MFCC_Delta9	0,536	0,000	X	X
MFCC_Delta10	0,516	0,000	X	X
MFCC_Delta11	0,541	0,000	X	X
MFCC_Delta12	0,555	0,000	X	X
MFCC_Delta13	0,577	0,000	X	X
MFCC_DeltaDelta1	0,640	0,000	X	X
MFCC_DeltaDelta2	0,717	0,000	X	X
MFCC_DeltaDelta3	0,610	0,000	X	X
MFCC_DeltaDelta4	0,595	0,000	X	X
MFCC_DeltaDelta5	0,565	0,000	X	X
MFCC_DeltaDelta6	0,537	0,000	X	X
MFCC_DeltaDelta7	0,561	0,000	X	X
MFCC_DeltaDelta8	0,528	0,000	X	X
MFCC_DeltaDelta9	0,552	0,000	X	X
MFCC_DeltaDelta10	0,532	0,000	X	X
MFCC_DeltaDelta11	0,557	0,000	X	X
MFCC_DeltaDelta12	0,569	0,000	X	X
MFCC_DeltaDelta13	0,586	0,000	X	X

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Merkmal	Wilks' Lambda Λ	Irrtumswahrscheinl. p	Signif.	Neu
Anteil Low-Energy-Frames				
Low_Energy	0,862	0,002	X	X
Low_Energy_Std	0,996	0,626		X
Low_Energy_Max	0,962	0,109		X
Low_Energy_Min	0,797	0,000	X	X
Fluctuation Pattern				
max_FP_focus	0,876	0,003	X	
min_FP_focus	0,660	0,000	X	
mean_FP_focus	0,681	0,000	X	
max_FP_CoG	0,796	0,000	X	
min_FP_CoG	0,751	0,000	X	
mean_FP_CoG	0,633	0,000	X	
max_FP_CoG2	0,782	0,000	X	
min_FP_CoG2	0,894	0,007	X	
mean_FP_CoG2	0,649	0,000	X	
mean_FP_fluctsumMax	0,636	0,000	X	
min_FP_fluctsumMax	0,922	0,021	X	
std_FP_fluctsumMax	0,591	0,000	X	
range_FP_fluctsumMax	0,719	0,000	X	
max_FP_fluctsumMax	0,603	0,000	X	
min_FP_fluctsumFrequ	0,974	0,186		
max_FP_fluctsumFrequ	0,588	0,000	X	
mean_FP_fluctsumFrequ	0,702	0,000	X	
mean_FP_barksumMax	0,685	0,000	X	
min_FP_barksumMax	0,944	0,051		
std_FP_barksumMax	0,767	0,000	X	
range_FP_barksumMax	0,839	0,001	X	
max_FP_barksumMax	0,727	0,000	X	
min_FP_barksumChannel	0,900	0,009	X	
max_FP_barksumChannel	0,686	0,000	X	
mean_FP_barksumChannel	0,579	0,000	X	
FP_medfocus	0,645	0,000	X	
FP_meanfocus	0,615	0,000	X	

C.3 Rhythmus-basierte Merkmale

Merkmalsname	Wilks' Lambda Λ	Irrtumswahrscheinl. p	Signif.	Neu
Rhythmus-Modell von Zwicker und Fastl				
onsetCount_mean	0,640	0,000	X	
onsetCount_std	0,993	0,505		
onsetCount_max	0,952	0,073		
onsetCount_range	1,000	0,931		
onsetCount_med	0,652	0,000	X	
onsetCount_skewness	0,835	0,001	X	
onsetCount_kurtosis	0,889	0,005	X	
onsetModeOccurrence	0,913	0,015	X	
onsetModeVal	0,789	0,000	X	
onsetHist_focus	0,932	0,032	X	
deltaN_lognMean	0,731	0,000	X	
deltaN_lognVar	0,987	0,357		
deltaN_max	0,812	0,000	X	
deltaN_range	0,821	0,000	X	
deltaN_med	0,752	0,000	X	
deltaN_skewness	0,899	0,008	X	
Inter Onset Interval Histogram				
Nvals_mean	0,855	0,001	X	
Nvals_std	0,887	0,005	X	
Nvals_peak	0,852	0,001	X	
Nvals_range	0,869	0,002	X	
Nvals_med	0,845	0,001	X	
Nvals_skewness	0,862	0,002	X	
Nvals_kurtosis	0,877	0,003	X	
Periodicity Histogram				
max_PH_focus	0,487	0,000	X	
min_PH_focus	0,816	0,000	X	
mean_PH_focus	0,399	0,000	X	
std_PH_focus	0,936	0,037	X	
max_PH_maxValue	0,458	0,000	X	
mean_PH_maxValue	0,590	0,000	X	
std_PH_maxValue	0,564	0,000	X	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Merkmal	Wilks' Lambda Λ	Irrtumswahrscheinl. p	Signif.	Neu
std_PH_maxTempo	0,871	0,003	X	
mean_PH_maxTempo	0,704	0,000	X	
mean_PH_sum	0,504	0,000	X	
std_PH_sum	0,521	0,000	X	
max_PH_sum	0,431	0,000	X	
range_PH_sum	0,574	0,000	X	
mean_PH_CoG	0,369	0,000	X	
range_PH_CoG	0,842	0,001	X	
max_PH_CoG	0,804	0,000	X	
Beat Tracking				
mean_onsetenv_peak	0,981	0,265		
max_onsetenv_peak	0,997	0,682		
mean_onsetenv_kurtosis	0,900	0,009	X	
max_onsetenv_kurtosis	1,000	0,917		
mean_onsetenv_std	0,961	0,109		
mean_onsetenv_mean	0,369	0,000	X	
std_onsetenv_mean	0,999	0,856		
range_onsetenv_mean	0,987	0,361		
max_onsetenv_mean	0,623	0,000	X	
skewness_onsetenv_mean	0,953	0,077		
kurtosis_onsetenv_mean	0,945	0,054		
mean_beatIntervals	0,924	0,023	X	
max_beatIntervals	0,902	0,009	X	
std_beatIntervals	0,875	0,003	X	
beatModeVal	1,000	0,928		
beatModeOccurrence	0,985	0,319		
beatHist_focus	0,998	0,745		
Beat Histogram				
BH_Maxima_BPM1	0,999	0,805		X
BH_Maxima_BPM2	0,966	0,130		X
BH_Maxima_BPM3	0,952	0,074		X
BH_Maxima_Amplitude1	0,805	0,000	X	X
BH_Maxima_Amplitude2	0,822	0,000	X	X
BH_Maxima_Amplitude3	0,919	0,019	X	X
BH_Summe000bis250	0,959	0,099		X
BH_Summe050bis090	0,972	0,173		X

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Merkmal	Wilks' Lambda Λ	Irrtumswahrscheinl. p	Signif.	Neu
BH.Summe090bis140	0,950	0,066		X
BH.Summe140bis200	0,966	0,132		X
BH.Rel.SumA	0,986	0,329		X
BH.Rel.SumB	0,998	0,712		X
BH.Rel.SumC	0,966	0,131		X
BH.Maxima_Amplitude_Rel	0,859	0,002	X	X
BH.Maxima_Amplitude_Rel3	0,814	0,000	X	X

C.4 Harmonische Merkmale

Merkmal	Wilks' Lambda Λ	Irrtumswahrscheinl. p	Signif.	Neu
Grundfrequenz				
Grundfrequenz_Mittelwert	0,931	0,030	X	X
Inharmonicity				
Inharmonicity	0,741	0,000	X	X
Inharmonicity_Std	0,673	0,000	X	X
Inharmonicity_Max	0,699	0,000	X	X
Inharmonicity_Min	0,942	0,048	X	X
Odd-to-even Harmonic Energy Ratio				
Odd_To_Even_Energy	0,867	0,002	X	X
Odd_To_Even_Energy_Std	0,893	0,007	X	X
Odd_To_Even_Energy_Max	0,940	0,045	X	X
Odd_To_Even_Energy_Min	0,934	0,035	X	X
Harmonic Spectral Deviation				
Harmonic_Spectral_Deviation	0,985	0,313		X
Harmonic_Spectral_Deviation_Std	0,900	0,009	X	X
Harmonic_Spectral_Deviation_Max	0,934	0,034	X	X
Harmonic_Spectral_Deviation_Min	0,847	0,001	X	X
Tristimulus				
Tristimulus1	0,962	0,112		X
Tristimulus1_Std	0,865	0,002	X	X
Tristimulus1_Max	0,932	0,032	X	X

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Merkmal	Wilks' Lambda Λ	Irrtumswahrscheinl. p	Signif.	Neu
Tristimulus1_Min	0,991	0,439		X
Tristimulus2	0,995	0,584		X
Tristimulus2_Std	1,000	0,949		X
Tristimulus2_Max	0,909	0,013	X	X
Tristimulus2_Min	0,997	0,659		X
Tristimulus3	0,758	0,000	X	X
Tristimulus3_Std	0,842	0,001	X	X
Tristimulus3_Max	0,988	0,381		X
Tristimulus3_Min	0,947	0,059		X
Noisiness				
Noisiness	1,000	0,935		X
Noisiness_Std	0,972	0,176		X
Noisiness_Max	0,966	0,132		X
Noisiness_Min	1,000	0,863		X
Sonanz				
Sonanz	0,365	0,000	X	X
Sonanz_Std	0,973	0,178		X
Sonanz_Max	0,640	0,000	X	X
Sonanz_Min	0,555	0,000	X	X
Spectral Flatness				
Spectral_Flatness1	0,513	0,000	X	X
Spectral_Flatness1_Std	0,998	0,719		X
Spectral_Flatness1_Max	0,788	0,000	X	X
Spectral_Flatness1_Min	0,897	0,008	X	X
Spectral_Flatness2	0,269	0,000	X	X
Spectral_Flatness2_Std	0,987	0,349		X
Spectral_Flatness2_Max	0,568	0,000	X	X
Spectral_Flatness2_Min	0,728	0,000	X	X
Spectral_Flatness3	0,392	0,000	X	X
Spectral_Flatness3_Std	0,998	0,719		X
Spectral_Flatness3_Max	0,619	0,000	X	X
Spectral_Flatness3_Min	0,806	0,000	X	X
Spectral_Flatness4	0,536	0,000	X	X
Spectral_Flatness4_Std	0,910	0,013	X	X
Spectral_Flatness4_Max	0,827	0,000	X	X
Spectral_Flatness4_Min	0,776	0,000	X	X

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Merkmal	Wilks' Lambda Λ	Irrtumswahrscheinl. p	Signif.	Neu
Spectral_Flatness5	0,525	0,000	X	X
Spectral_Flatness5_Std	0,765	0,000	X	X
Spectral_Flatness5_Max	0,672	0,000	X	X
Spectral_Flatness5_Min	0,921	0,020	X	X
Spectral_Flatness6	0,939	0,042	X	X
Spectral_Flatness6_Std	0,909	0,012	X	X
Spectral_Flatness6_Max	0,868	0,002	X	X
Tonality				
Tonality1	0,782	0,000	X	X
Tonality2	0,569	0,000	X	X
Tonality3	0,631	0,000	X	X
Spectral Crest Factor				
Spectral_Crest_Factor1	0,620	0,000	X	X
Spectral_Crest_Factor1_Std	0,958	0,094		X
Spectral_Crest_Factor1_Max	0,942	0,048	X	X
Spectral_Crest_Factor1_Min	0,588	0,000	X	X
Spectral_Crest_Factor2	0,353	0,000	X	X
Spectral_Crest_Factor2_Std	0,846	0,001	X	X
Spectral_Crest_Factor2_Max	0,804	0,000	X	X
Spectral_Crest_Factor2_Min	0,606	0,000	X	X
Spectral_Crest_Factor3	0,517	0,000	X	X
Spectral_Crest_Factor3_Std	0,867	0,002	X	X
Spectral_Crest_Factor3_Max	0,863	0,002	X	X
Spectral_Crest_Factor3_Min	0,651	0,000	X	X
Spectral_Crest_Factor4	0,686	0,000	X	X
Spectral_Crest_Factor4_Std	0,827	0,000	X	X
Spectral_Crest_Factor4_Max	0,866	0,002	X	X
Spectral_Crest_Factor4_Min	0,877	0,003	X	X
Spectral_Crest_Factor5	0,747	0,000	X	X
Spectral_Crest_Factor5_Std	0,828	0,000	X	X
Spectral_Crest_Factor5_Max	0,872	0,003	X	X
Spectral_Crest_Factor5_Min	0,985	0,322		X
Spectral_Crest_Factor6	1,000	0,966		X
Spectral_Crest_Factor6_Std	0,999	0,778		X
Spectral_Crest_Factor6_Max	0,996	0,588		X
Spectral_Crest_Factor6_Min	1,000	0,950		X

C.5 Basismerkmale im Zeitbereich

Merkmal	Wilks' Lambda Λ	Irrtums- wahrscheinl. p	Signif.	Neu
Zero-Crossing Rate				
ZeroCrossingRate	0,708	0,000	X	X
ZeroCrossingRateStd	0,846	0,001	X	X
ZeroCrossingRateMax	0,836	0,001	X	X
ZeroCrossingRateMin	0,866	0,002	X	X
Autokorrelations-Koeffizienten				
Auto_Correlation_Coeff1	0,916	0,017	X	X
Auto_Correlation_Coeff2	0,917	0,017	X	X
Auto_Correlation_Coeff3	0,919	0,018	X	X
Auto_Correlation_Coeff4	0,921	0,020	X	X
Auto_Correlation_Coeff5	0,924	0,023	X	X
Auto_Correlation_Coeff6	0,927	0,026	X	X
Auto_Correlation_Coeff7	0,930	0,029	X	X
Auto_Correlation_Coeff8	0,932	0,032	X	X
Auto_Correlation_Coeff9	0,935	0,035	X	X
Auto_Correlation_Coeff10	0,937	0,039	X	X
Auto_Correlation_Coeff11	0,939	0,042	X	X
Auto_Correlation_Coeff12	0,940	0,045	X	X
Root-Mean-Square				
Root_Mean_Square	0,867	0,002	X	X
Root_Mean_Square_Std	0,891	0,006	X	X
Root_Mean_Square_Max	0,918	0,018	X	X
Root_Mean_Square_Min	0,971	0,164		X

C.6 Basismerkmale im Frequenzbereich

Merkm ^{al}	Wilks' Lambda Λ	Irrtums- wahrscheinl. p	Signif.	Neu
Spectral Centroid				
Spectral_Centroid	0,803	0,000	X	X
Spectral_Centroid_Std	0,890	0,006	X	X
Spectral_Centroid_Max	0,909	0,012	X	X
Spectral_Centroid_Min	0,934	0,034	X	X
Spectral_Centroid2	0,811	0,000	X	X
Spectral_Centroid2_Std	0,891	0,006	X	X
Spectral_Centroid2_Max	0,902	0,009	X	X
Spectral_Centroid2_Min	0,927	0,026	X	X
Spectral_Centroid_log	0,951	0,069		X
Spectral_Centroid_log_Std	1,000	0,919		X
Spectral_Centroid_log_Max	0,986	0,328		X
Spectral_Centroid_log_Min	0,979	0,236		X
Bandwidth				
Spectral_Bandwidth	0,639	0,000	X	X
Spectral_Bandwidth_Std	0,770	0,000	X	X
Spectral_Bandwidth_Max	0,785	0,000	X	X
Spectral_Bandwidth_Min	0,811	0,000	X	X
Spectral_Bandwidth_log	0,953	0,074		X
Spectral_Bandwidth_log_Max	0,921	0,020	X	X
Spectral_Bandwidth_log_Min	1,000	0,928		X
Spectral Spread				
Spectral_Spread	0,870	0,003	X	X
Spectral_Spread_Std	0,898	0,008	X	X
Spectral_Spread_Max	0,915	0,016	X	X
Spectral_Spread_Min	0,954	0,080		X
Spectral Skewness				
Spectral_Skewness	0,934	0,034	X	X
Spectral_Skewness_Std	0,951	0,071		X
Spectral_Skewness_Max	0,954	0,078		X
Spectral_Skewness_Min	0,984	0,303		X
Spectral Kurtosis				
Spectral_Kurtosis	0,971	0,164		X

Fortsetzung auf der nächsten Seite

C.6 – BASISMERKMALE IM FREQUENZBEREICH

Merkm ^{al}	Wilks' Lambda Λ	Irrtums- wahrscheinl. p	Signif.	Neu
Spectral_Kurtosis_Std	0,971	0,162		X
Spectral_Kurtosis_Max	0,965	0,125		X
Spectral_Kurtosis_Min	0,965	0,127		X
Spectral Roll-off-Frequenz				
Spectral_Rolloff_Freq	0,704	0,000	X	X
Spectral_Rolloff_Freq_Std	0,942	0,049	X	X
Spectral_Rolloff_Freq_Max	0,925	0,024	X	X
Spectral_Rolloff_Freq_Min	0,846	0,001	X	X
Spectral_Rolloff_Freq2	0,711	0,000	X	X
Spectral_Rolloff_Freq2_Std	0,810	0,000	X	X
Spectral_Rolloff_Freq2_Max	0,777	0,000	X	X
Spectral_Rolloff_Freq2_Min	0,856	0,001	X	X
Spectral Decrease				
Spectral_Decrease	0,919	0,019	X	X
Spectral_Decrease_Std	0,984	0,297		X
Spectral_Decrease_Max	0,985	0,327		X
Spectral_Decrease_Min	0,906	0,011	X	X
Spectral_Decrease2	0,919	0,019	X	X
Spectral_Decrease2_Std	0,984	0,297		X
Spectral_Decrease2_Max	0,985	0,327		X
Spectral_Decrease2_Min	0,906	0,011	X	X
Band Energy Ratio				
Band_Energy_Ratio	0,998	0,751		X
Band_Energy_Ratio_Std	1,000	0,933		X
Band_Energy_Ratio_Max	0,997	0,644		X
Band_Energy_Ratio_Min	1,000	0,994		X
Uniformity				
Uniformity	0,523	0,000	X	X
Uniformity_Std	0,910	0,013	X	X
Uniformity_Max	0,617	0,000	X	X
Uniformity_Min	0,835	0,001	X	X

D Ergebnisse der Diskriminanzfunktion

Musikstück	$y(\vec{x})$
Dvořák - Slawischer Tanz Op. 46-1	5,954
Pirates of the Caribbean - To the Pirates Cave	5,602
Brahms - Violinkonzert Op. 77-3	5,464
Saint-Saëns - Karneval der Tiere, Fossilien	5,389
Khachaturian - Masquerade Suite, Galop	5,194
Dvořák - Slawischer Tanz Op. 46-8	5,067
Stravinsky - Le Sacre du Printemps 10	4,912
Pirates of the Caribbean - Barbossa Is Hungry	4,760
Khachaturian - Spartacus, Pirates	4,756
Meyerbeer - Krönungsmarsch kurz	4,725
Saint-Saens - Karneval der Tiere, Finale	4,687
Beethoven - Violinkonzert Op. 61-3	4,656
Mozart - Klavierkonzert 21-1	4,539
Beethoven - Sinfonie 5-4	4,426
Brahms - Sinfonie 4-3	4,407
Vivaldi - Op. 8-4 L'Inverno	4,403
Pirates of the Caribbean - Will and Elizabeth	4,349
Kabalevsky - The Comedians, Galop	4,338
Bach - Konzert BWV 1047-1	4,335
Dvořák - Slawischer Tanz Op. 72-1 Ausschnitt	4,320
Strauß - Radetzky-Marsch	4,298
Vivaldi - Op. 8-2 L'Estate	4,138
Stravinsky - Feuervogel 4	4,037
Dvořák - Carnival Overture Op. 92	3,924
Kabalevsky - The Comedians, Epilogue	3,786
Beethoven - Klavierkonzert 5-3	3,688
Vivaldi - Op. 8-3 L'Autunno	3,511
Strauss - Don Juan	3,493
Beethoven - Klavierkonzert 5-1	3,452

Musikstück	$y(\vec{x})$
Khachaturian - Gayane Suite, Säbeltanz	3,259
Liszt - Klavierkonzert 1-1	3,056
Vivaldi - Op. 8-1 La Primavera	2,673
Beethoven - Sinfonie 5-1	2,492
Brahms - Sinfonie 4-4	1,691
Pachelbel - Kanon D-Dur	-1,530
Brahms - Sinfonie 3-2	-2,583
Mozart - Klavierkonzert-Schleife Tini	-2,737
Beethoven - Klavierkonzert 3-2	-2,989
Barber - Adagio for strings	-3,096
Wiegenlied - Guter Mond du gehst so stille	-3,318
Khachaturian - Spartacus, Spartacus and Phrygia	-3,481
Satie - 4eme Gnossiennes	-3,497
Beethoven - Klaviersonate 14-1 B	-3,568
Mozart - Klavierkonzert 21-2	-3,756
Beethoven - Klaviersonate 14-1 A	-3,769
Bach - Orchestersuite 3-2 Air A	-3,833
Bach - Sonate BWV 1034-I	-3,851
Beethoven - Sinfonie 6-2	-3,966
Mahler - Sinfonie 5-4	-3,975
Satie - Gnossiennes 2	-4,098
Satie - Gnossiennes 3	-4,136
Beethoven - Klavierkonzert 5-2	-4,158
Satie - Gymnopedie 3	-4,302
Bach - Orchestersuite 3-2 Air B	-4,349
Bach - Orchestersuite-Schleife	-4,488
Händel - Berenice, Menuett	-4,545
Brahms - Choralvorspiel Op. 122-3	-4,579
Dvořák - Romanze für Violine	-4,689
Händel - Harfenkonzert Op. 4-6-2	-4,841
Grieg - Peer Gynt, Solveigs Song	-4,978
Saint-Saens - Karneval der Tiere, Schwan	-5,034
Brahms - Choralvorspiel WoO 7	-5,110
Mendelssohn - Klavierkonzert 1-2	-5,243
Satie - Gnossiennes 1	-5,316
Debussy - Suite Bergamasque, Clair de lune	-5,360
Bach - Konzert BWV 1043-2	-5,473
Mozart - Ave verum corpus	-5,829
Schubert - Ave Maria	-7,305

E Publikationsliste

Teile dieser Arbeit wurden in folgenden Organen veröffentlicht:

Wissenschaftliche Fachjournale und Bücher

P. Friedrich, J. Clauss, A. Scholz, B. Wolf *Ambient Medicine*[®] - *Telematic Medical Systems for Individualized and Personalized Assistance* ITU-Report und Journal eHealth, Japan, Journal for eHealth Technology and Application (Japan), im Druck

Friedrich. P., Clauss, J., Scholz A., Wolf, B. *Sensorik für telemedizinische Anwendungen* in Goss, Middeke, Smetak (Hrsg.) *Praktische Telemedizin in Kardiologie und Hypertensiologie*, 2009, Georg Thieme Verlag, S. 6-14, ISBN 978-3-13-149931-8

Wolf, B., Clauss, J., **Friedrich, P.**, Gruber, H.-G., Scholz, A. *Telematische medizinische Systeme für die individualisierte und personalisierte Assistenz, Teil 2.* ntz Fachzeitschrift für Informations- und Kommunikationstechnik 62 (2009) H.2, S. 36-39, VDE Verlag GmbH, Berlin Offenbach, ISSN 0948-728X

Wolf, B., Clauss, J., **Friedrich, P.**, Gruber, H.-G., Scholz, A. *Telematische medizinische Systeme für die individualisierte und personalisierte Assistenz, Teil 1.* ntz Fachzeitschrift für Informations- und Kommunikationstechnik 62 (2009) H.1, S. 14-17, VDE Verlag GmbH, Berlin Offenbach, ISSN 0948-728X

P. Friedrich, A. Scholz, J. Clauss, B. Wolf, *Ambient Medicine*[®] - *Telemedical Assistance for Personalized Diagnostic and Intervention*, Journal of eHealth Technology and Application Vol.5, No.3, September 2007, p. 253-260, ISSN 1881-4581, Supported by ITU-D SG-2 Q14, Published by Tokai University and National Institute of Information and Communications Technology

Sonstige Druckschriften

B. Wolf, **P. Friedrich**, S. Becker, J. Clauss, D. A. Hofsøy, A. Scholz *Ambient Medicine*[®] - *sensor-gestützte Assistenzsysteme für die telematische Diagnose und Therapie*, In: e-Health 2010 Informationstechnologien und Telematik im Gesundheitswesen / Frank Duesberg (Hrsg.), Solingen, S. 230-236, ISBN 978-3-00-029297-2

Friedrich, P., Wolf, B. *Ambient Medicine*[®] - *Prävention mit telematischen Systemen*, Technik in Bayern 2/2009, S. 36-37, Verlag Neuer Merkur GmbH, München, ISSN 1610-6536

P. Friedrich, A. Messmer, S. Tübinger, B. Wolf *Das Projekt SyCare – Telemedizinische Assistenz für personalisierte Diagnostik und Intervention*, Telemedizinführer Deutschland / Achim Jäckel (Hrsg.) - Ausgabe 2008 - , Bad Nauheim, S. 123-127, ISBN 978-3-937948-06-5

P. Friedrich, A. Scholz, J. Clauss, H.-G. Gruber, B. Wolf *Der Arzt im Gepäck – sensorgestützte telemedizinische Konzepte für Diagnostik und Therapie*, Telemedizinführer Deutschland / Achim Jäckel (Hrsg.) - Ausgabe 2007 - , Bad Nauheim, S. 266-271, ISBN 978-3-937948-05-8

Fachtagungen

Poster mit Tagungsband:

Wolf, B., **Friedrich, P.**, Clauss, J., Scholz, A. *Telematic Medical Systems for Individualized and Personalized Assistance*, World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, September 7 - 12, 2009, Munich, Germany, Olaf Dössel, Wolfgang C. Schlegel (Hrsg.), IFMBE Proceedings 25/V, 2009, p. 13-16 , ISBN 978-3-642-03903-4, Springer Verlag Heidelberg

Friedrich, P., Maroun, D., Weber, R., Martius, P., Wolf, B. *Evaluation eines therapeutischen Feedback- und Assistenzsystems*, Ambient Assisted Living 2. Deutscher Kongress, 27.-28.1.2009, Berlin, ISBN 978-3-8007-3138-1, S. 479-483, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 10625 Berlin

Friedrich, P., Maroun, D., Weber, R., Martius, P., Wolf, B. *Einsatz eines Virtual Lab's zur Evaluation musiktherapeutischer Konzepte*, Mozart & Science, 2. wissenschaftlicher Kongress der interdisziplinären Musikwirkungsforschung, 16.-19.11.2008, Wien

Petra Friedrich, Alexander Heinz, Andreas Messmer, Bernhard Wolf *Automatisierte evidenzbasierte Interventionsstrecke für Biofeedback-Therapien*, Ambient Assisted Living 1. Deutscher Kongress, 30.1.-1.2.2008, Berlin, ISBN 978-3-8007-3076-6, S. 369-370, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 10625 Berlin

P. Friedrich, D. Baumann, P. Adigbli, B. Wolf *Entwicklung eines softwaregestützten Analysetools für komplexe akustische Signale*, BMT 2007 – 41. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Biomedizinische Technik (DGBMT) im VDE - Proceedings, Aachen, 26.09-29.09 2007, Biomedizinische Technik Vol. 52 (2997) Ergänzungsband, ISSN 0939-4990, Biosignalverarbeitung Poster Nr. 48021 Verlag: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 10785 Berlin

A. Messmer, **P. Friedrich**, A. Scholz, S. Tübinger, B. Wolf *Aufbau eines virtuellen Telemedizin-Labors zur Therapieassistenz im Bereich der arteriellen Hypertonie*, BMT 2007 – 41. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Biomedizinische Technik (DGBMT) im VDE - Proceedings, Aachen, 26.09-29.09 2007, Biomedizinische Technik Vol. 52 (2997) Ergänzungsband, ISSN 0939-4990, Monitoring Poster Nr. 48043, Verlag: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 10785 Berlin

P. Friedrich, A. Scholz, J. Clauss, D. Benning, B. Wolf *Virtuelles Labor zur Analyse personalisierter akustischer Biofeedback-Therapien*, Fortschritte der Akustik: 32. Deutsche Jahrestagung für Akustik DAGA 06, 20.-23.3.2006 in Braunschweig, ISBN:3-9808659-2-4, S. 711-712, Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Sabine Langer, Prof. Dr.-Ing. Werner Scholl, Dr.-Ing. Volker Wittstock Verlag: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 13355 Berlin

P. Friedrich, A. Scholz, B. Wolf *Virtuelles Telemedizin-Labor zur Erprobung personalisierter akustischer Biofeedbacktherapien*, BMT 2006 – Gemeinsame Jahrestagung der Schweizerischen, Deutschen und Österreichischen Gesellschaft für Biomedizinische Technik - Proceedings, Zürich, 04.09-09.09 2006, ISSN 0939-4990, p 60 und Tagungsband P36

P. Friedrich, R. Weber, A. Messmer, G. Klein, B. Wolf, *Erprobung einer personalisierten Biofeedback-Therapie im Rahmen eines virtuellen Labs am Beispiel der essentiellen Hypertonie*, 30. wissenschaftlicher Kongress „Hypertonie 2006“, München, DMW 131. Jahrgang, 46, Supplement Nr. 6 mit dem Erscheinungstag 17.11.2006, S.169

B. Wolf, **P. Friedrich**, A. Scholz, J. Clauss, H.-G. Gruber, *Der Arzt im Gepäck –sensorgestützte personalisierte telemedizinische Konzepte für Diagnostik und Therapie*, 30. wissenschaftlicher Kongress „Hypertonie 2006“, München, DMW 131. Jahrgang, 46, Supplement Nr. 6 mit dem Erscheinungstag 17.11.2006, S.170

Poster:

Bernhard Wolf, **Petra Friedrich**, Thomas Spittler *COMES® - ein sensorgestütztes Assistenzsystem für die telematische Prävention und Studiendurchführung*, Hypertoniemkongress 2009, 19.-21.11.2009, Lübeck

Petra Friedrich, Dominik Maroun, Reinhard Weber, Philipp A. Martius, Bernhard Wolf *Das Virtual Lab zur Evaluation eines nicht-medikamentösen Therapiekonzeptes bei Hypertonie*. Hypertoniemkongress 2009, 19.-21.11.2009, Lübeck

Martius Philipp, **Friedrich Petra**, Weber Reinhard, Wolf Bernhard, *Prävention und Rehabilitation mit telemedizinischen Systemen - Überblick und erste Erfahrungen in der Psychosomatik*, 4. Reha-Symposium des NRRFB, 23.10.09, Herzogenaurach

Petra Friedrich, Andreas Messmer, Dominic Benning, Daniel Baumann, B. Wolf, *A virtual telemedicine lab for the development of personalized acoustic biofeedback therapy strategies*, Poster, 11th Annual Meeting, The Biofeedback Foundation of Europe, Berlin, 1.3.07

Vorträge mit Tagungsband

P. Friedrich, T. Spittler, J. Clauss, A. Scholz, W. Tiedge, S. Tübinger, B. Wolf *Mobile Healthcare - Auf Anruf Arzt- (a³)*, Ambient Assisted Living 3. Deutscher Kongress, 26.-27.1.2010, Berlin, im Druck

Friedrich, P., Kohler, T., Wolf, B. *On the classification of acoustic sequences for intervention in essential hypertension*, World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, September 7 - 12, 2009, Munich, Germany, Olaf Dössel, Wolfgang C. Schlegel (Hrsg.), IFMBE Proceedings 25/IV, 2009, p. 85-88, ISBN 978-3-642-03881-5, Springer Verlag Heidelberg

Friedrich, P., Maroun, D., Weber, R., Martius, P., Wolf, B. *Innovative acoustic Biofeedback Interventions for Hypertension*, World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, September 7 - 12, 2009, Munich, Germany, Olaf Dössel, Wolfgang C. Schlegel (Hrsg.), IFMBE Proceedings 25/VII, 2009, p. 23-26, ISBN 978-3-642-03884-6, Springer Verlag Heidelberg

Friedrich, P., Kohler, T., Wolf, B. *On the Classification of Acoustic Sequences for Intervention in Essential Hypertension*, International Conference on Acoustics Rotterdam, 23.-26.3.09, NAG/DAGA 2009, ISBN 978-3-9808659-6-8, pp. 1580-1583

Wolf, B., Clauss, J., **Friedrich, P.**, Gruber, H.-G., Scholz, A. *Telematische medizinische Systeme für die individualisierte und personalisierte Assistenz*, Ambient Assisted Living 2. Deutscher Kongress, 27.-28.1.2009, Berlin, ISBN 978-3-8007-3138-1, S. 126-130, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 10625 Berlin

Tiedge, W., **Friedrich, P.**, Wolf, B. *Aktivitäts- und Gesundheitswerte einfach erfasst und dargestellt*, Ambient Assisted Living 2. Deutscher Kongress, 27.-28.1.2009, Berlin, ISBN 978-3-8007-3138-1, S. 306-309, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 10625 Berlin

Wolf, B., Clauss, J., **Friedrich, P.**, Gruber, H.-G., Scholz, A., Tiedge, W., Tübinger, S. *Ambient Medicine*[®] - *Elektronische Systeme und Medien für die aktive Gesundheitsforschung und -gestaltung*, ITG Fachtagung 3.-5.11.08, VDE Kongress 2008, München, ISBN 978-3-8007-3126-8, Verlag: VDE Verlag GmbH, Berlin Offenbach

P. Friedrich, Thomas Flurschütz, Christine Georg, Bernhard Wolf, *Ermittlung bioakustisch relevanter Klangmuster zur Modulation von metabolischen und zentralnervösen Funktionen*, Fortschritte der Akustik: 34. Deutsche Jahrestagung für Akustik DAGA 08, 10.-13.3.2008 in Dresden, ISBN: 978-3-9808659-4-4, S. 827-828, Wiss. Herausgeber: Prof. Dr. phil. Ute Jekosch, Prof. Dr.-Ing. habil. Rüdiger Hoffmann, Verlag: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 13355 Berlin

Petra Friedrich, Stefan Tübinger, Bernhard Wolf *SyCare - die Ambient Medicine*[®] *Plattform für innovative Therapieunterstützung*, Ambient Assisted Living 1. Deutscher Kongress, 30.1.-1.2.2008, Berlin, ISBN 978-3-8007-3076-6, S. 315-318, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 10625 Berlin

P. Friedrich, A. Messmer, S. Tübinger, B. Wolf *Die Ambient Medicine*[®] *Plattform für innovative Therapieunterstützung - SyCare*, BMT 2007 – 41. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Biomedizinische Technik (DGBMT) im VDE - Proceedings, Aachen, 26.09-29.09 2007, Biomedizinische Technik Vol. 52 (2997) Ergänzungsband, ISSN 0939-4990, Session F7: Wissensbasierte Systeme, Verlag: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 10785 Berlin

D. Benning, **P. Friedrich**, B. Wolf *The implementation of a mathematical human circulatory control model in Matlab Simulink*, BMT 2007 – 41. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Biomedizinische Technik (DGBMT) im VDE - Proceedings, Aachen, 26.09-29.09 2007, Biomedizinische Technik Vol. 52 (2997) Ergänzungsband, ISSN 0939-4990, Session D5: Modellbildung und Simulation IV Verlag: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 10785 Berlin

A. Heinz, **P. Friedrich**, J. Clauss, B. Wolf *Entwicklung einer vollautomatisierten Intervention für Biofeedback-Therapien*, BMT 2007 – 41. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Biomedizinische Technik (DGBMT) im VDE - Proceedings, Aachen, 26.09-29.09 2007, Biomedizinische Technik Vol. 52 (2997) Ergänzungsband, ISSN 0939-4990, Session C7: Monitoring, Verlag: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 10785 Berlin

P. Friedrich, A. Messmer, A. Heinz, S. Tübinger, J. Clauss, B. Wolf *Das Projekt SyCare - Telemedizinische Assistenz für personalisierte Diagnostik und Intervention*, WÜMEK, 21.-23.5.07, Würzburg, Herausgeber: Dr. Jürgen Nippa, Euritim Fortbildung und Beratung Ltd. & Co. KG Verlag: EURITIM Fortbildung und Beratung Ltd. & Co. KG, 35578 Wetzlar

P. Friedrich, A. Scholz, J. Clauss, H.-G. Gruber, B. Wolf *The Mobile Doctor: Ambient Medicine*[®] *Through Sensor-Aided Personalized Telemedical Devices*, Med-e-Tel, Luxembourg, 18.-20.4.07, Proceedings, ISSN: 1819-186X, p. 83-86, Herausgeber: Malina Jordanova & Frank Lievens;

P. Friedrich, A. Scholz, J. Clauss, H.-G. Gruber, B. Wolf *Concepts and Strategies for personalized telemedical Biofeedback-Therapies*, Med-e-Tel, Luxembourg, 18.-20.4.07, Proceedings, ISSN: 1819-186X, p. 57-60, Herausgeber: Malina Jordanova & Frank Lievens;

P. Friedrich, A. Scholz, J. Clauss, H.-G. Gruber, B. Wolf *Der Arzt im Gepäck – sensorgestützte personalisierte Telemedizinische Geräte ermöglichen Ambient Medicine*[®], ITG Diskussionsforum 25.10.06, VDE Kongress 2006, Aachen, Band 1, ISBN 978-3-8007-2979-1, S.391-398, Herausgeber: Wolfgang Schröppel (Tagungsleiter) Verlag: VDE Verlag GmbH, 10625 Berlin

Vorträge

Petra Friedrich, Gerda Neuwirth, Mark Schwartz, Bernhard Wolf, *The Importance of Music in personalized Therapies and Biofeedback*, 14th Annual Meeting, The Biofeedback Foundation of Europe, Rom, 13.-17.4.10, eingereicht

Friedrich, P., Maroun, D., Weber, R., Martius, P. A., Klein, G., Wolf, B. *Treating hypertension with music*, 13th Annual Meeting, The Biofeedback Foundation of Europe, Eindhoven, 26.2.09

Petra Friedrich, Bernhard Wolf *To the importance of telemetric biofeedback technologies for the development of systemic therapeutic approaches*, 12th Annual Meeting, The Biofeedback Foundation of Europe, Salzburg, 21.2.08

Petra Friedrich, Reinhard Weber, Philip Martius, Gernot Klein, Bernhard Wolf, *Lowering blood pressure with a new telemedical acoustic biofeedback-therapy by using a virtual lab*, Poster, 12th Annual Meeting, The Biofeedback Foundation of Europe, Salzburg, 21.2.08

P. Friedrich, B. Wolf *Das Projekt SyCare®: Telemedizinische Assistenz für personalisierte Diagnostik und Intervention*, Fachtagung Telemedizin in der Kardiologie, Forum MedTech Pharma e.V., 16.05.07, Regensburg

P. Friedrich, A. Scholz, J. Clauss, B. Wolf *Concepts and strategies for personalized telemedical biofeedback-therapies*, Vortrag, 11th Annual Meeting, The Biofeedback Foundation of Europe, Berlin, 1.3.07

B. Wolf, **P. Friedrich**, *Der Arzt im Gepäck – Telemedizinische Assistenz für Diagnostik und Intervention*, 24.11.06, Fortbildung Hypertensiologie DHL, 30. wissenschaftlicher Kongress „Hypertonie 2006“, München

Abbildungsverzeichnis

Abbildung	Seite
1 Heilung mit Musik im Mittelalter	v
1.1 Die Ambient Medicine® Plattform zur telemedizinischen Versorgung	2
1.2 Das Telemetric Personal Health Monitoring - System	4
1.3 Allgemeine Systemübersicht eines telemedizinischen Gesamtkonzeptes	6
1.4 Telemedizinisches Blutdruckmesssystem	8
1.5 Das Virtual Lab - ein virtuelles telemedizinisches Labor	9
1.6 Der Aufbau und die Struktur der Arbeit	11
2.1 Technisches und biologisches Regelkreisschema	13
2.2 Das Herz-Kreislauf-System	16
2.3 Die vier Aktionsphasen des Herzens	17
2.4 Die typische EKG-Kurve	17
2.5 Das Erregungsleitungssystem des Herzens	18
2.6 Die Innervation des Herzens	19
2.7 Normaler Blutdruckverlauf in den verschiedenen Partitionen des Kreislaufsystems	20

2.8	Die sympathische und parasympathische Versorgung des Herzens	24
2.9	Schema der sympathischen und parasympathischen Innervation des kardiovaskulären Systems	28
2.10	Zentrale Kreislaufregulation	29
2.11	Barorezeptoren	29
2.12	Stärken und zeitliches Ansprechverhalten der Blutdruckregelungsmechanismen	33
2.13	Die optimalen Wirkungsbereiche der verschiedenen Regelungsmechanismen . .	34
2.14	Überblick der an der Blutdruckregulation beteiligten Mechanismen	34
2.15	Hypertonieprävalenz in der Bundesrepublik Deutschland	36
2.16	Querschnitt Außen-, Mittel- und Innenohr	50
2.17	Querschnitt durch eine Cochleawindung	51
2.18	Das Cortische Organ	52
2.19	Frequenz-Orts-Transformation	52
2.20	Der auditorische Pfad der Reizleitung und -verarbeitung in vereinfachter Darstellung am Beispiel einer afferenten Hörbahn	55
2.21	Schematische Darstellung des großen sensorischen und motorischen Systems des menschlichen Gehirns	57
2.22	Das neurokognitive Modell der Musikperzeption	60
2.23	Das Virtual Lab	65
2.24	Traditionelles und telemedizinisches Konzept zur Blutdrucküberwachung .	66
3.1	Effizienzsteigerung durch Mikroelektronik	69

3.2	Meilensteine der Elektronikentwicklung	70
3.3	Beispiele diverser Blutdruckmessgeräte zur Blutdruckselbstmessung verschiedener Hersteller.	74
3.4	Blutdruckmessgeräte mit Bluetooth-Übertragung zur Selbstmessung realisiert von der Sendor GmbH	75
3.5	Weitere verfügbare Blutdruckmessgeräte mit Bluetooth-Übertragung zur Selbstmessung.	75
3.6	EKG-Gerät mit Anbindung an ein Daten Center von Corscience	77
3.7	EKG-Geräte und das Servicekonzept von Vitaphone	77
3.8	Weitere verfügbare mobile EKG-Lösungen	78
3.9	Heart Man inkl. Grafikanalyse von Heart Balance	79
3.10	Diabetes-Handy von LG	80
3.11	Das Leistungsangebot von Medgate	82
3.12	Der Prozessablauf bei Medgate	82
4.1	Gesamtsystem mit den Kommunikationsstrecken	87
4.2	Die Mobiltelefone des Virtual Lab	88
4.3	Funktionsweise der implementierten Interventionssoftware	89
4.4	Die patientengerechte Ausstattung – der Messkitkoffer	90
4.5	Zwei Anwendungsbeispiele der akustischen Biofeedback-Therapie mittels Virtual Lab	90
4.6	Ein exemplarischer Screenshot der SynergyCare Benutzeroberfläche	91
4.7	Spektrogramm 5. Sinfonie Beethoven	97

4.8	Ein- und zweidimensionaler Merkmalsraum	99
4.9	Schema Merkmalsextraktion und Klassifizierung	100
4.10	Vier Beispiele für Wilks' Lambda	104
5.1	Auswertung der Messdaten von Proband 12	110
5.2	Boxplot für Proband 12, systolischer Blutdruck	112
5.3	Boxplot für Proband 12, diastolischer Blutdruck	112
5.4	Post-Prä-Differenzen systolisch Proband 12	113
5.5	Post-Prä-Differenzen diastolisch Proband 12	113
5.6	Trendlinie von Proband 12	113
5.7	Zusammenfassung der Auswertung	114
5.8	Tonheit-Frequenz-Diagramm	120
5.9	Zusammenhang zwischen der Tonhöhe und dem detektierenden Ort auf der Basilarmembran	121
5.10	Kurven gleicher Lautheit	122
5.11	Beispiele für die Verteilung von vier Merkmalen	123
5.12	Gewichtungsfunktion $g(z)$ für die Schärfe	125
5.13	Filterbänke für die Mel-Skalierung	128
5.14	Fluctuation Pattern	134
5.15	Amplitudenverlauf eines Klaviertons	136
5.16	Amplitudenverlauf eines Walzers	142
5.17	Vier Beispiele für das Beat Histogramm	144

5.18	Gewichtungsfunktion für die Inharmonizität	150
5.19	Schema Merkmalsextraktion und Klassifizierung	165
5.20	Zwei normalverteilte Zufallsgrößen	168
5.21	Klassifizierung mit Entscheidungsbaum	169
5.22	Zweidimensionale Klassifizierung mit Support Vector Machine	173
5.23	Verteilung der ergotropen und trophotropen Musikstücke auf der Diskriminanzachse	182
5.24	Zeitaufgelöste Diskriminanzfunktion von Khachaturians Adagio von Spartacus und Phrygia aus Spartakus	186
5.25	Zeitaufgelöste Diskriminanzfunktion von Pachelbels Kanon aus Kanon und Gigue D-Dur	187
7.1	Bedarfsgerechte telemedizinische Assistenzlösungen	196
7.2	Personalisiertes Feedback mit interaktivem Dialog	211
8.1	Das COMES [®] Gesamtkonzept	218
8.2	Das COMES [®] Expertensystem	218
8.3	Beispiel eines Info-Films auf einem Smart Phone	219

Tabellenverzeichnis

Tabelle	Seite
2.1 Definition und Klassifikation von Blutdruckbereichen	39
2.2 Definitionen des Dipping-Verhaltens	40
2.4 Übersicht der Therapiemöglichkeiten mit ihren zu erwartenden Wirksamkeiten bei primärer Hypertonie	48
4.1 Abkürzungen der Kommunikationsstreckenabschnitte	87
5.2 Sechs Frequenzbänder für die harmonischen Merkmale	155
5.4 Die besten Merkmalen und ihre Kategorie	163
5.6 Iterationen zur endgültigen Auswahl von 17 Merkmalen	179
5.8 Die ermittelten 17 Merkmale der Diskriminanzfunktion und ihr Gewicht .	182
5.10 Ergebnisse des Kreuzvalidierungstests	183

Literaturverzeichnis

- [1] *RTX3370 Telehealth Monitor - PSTN*. <http://www.tunstallhealthcare.com/Default.aspx?ID=2137>. Version: 10.12.2009
- [2] *A&D Company Limited*. http://www.aandd.jp/products/medical/bluetooth/ua_767pbt.html. Version: 12.12.2009
- [3] *Corscience GmbH & Co. KG*. www.corscience.de. Version: 12.12.2009
- [4] *Interactive Institute. BodyResT*. <https://www.tii.se/projects/bodyrest>. Version: 12.12.2009
- [5] *Mytech Technology Ltd*. <http://mytech-tel.en.alibaba.com/aboutus.html>. Version: 12.12.2009
- [6] *OMRON Medizintechnik Handelsgesellschaft mbH*. <http://www.omron-medizintechnik.de/herzfrequenz-messgeraete/hcg-801-e.html>. Version: 15.12.12009
- [7] *Vitaphone GmbH*. www.vitaphone.de. Version: 15.12.2009
- [8] *I.E.M.* <http://www.iem.de/d/index.html>. Version: 1.6.2009
- [9] *Austrian Research Centers GmbH*. http://www.arcsmed.at/index.php?option=com_content&task=view&id=199&Itemid=191&. Version: 18.12.2008
- [10] *Sendsor GmbH*. <http://www.sendsor.de>. Version: 18.12.2008
- [11] *MIREX. Music Information Retrieval Evaluation eXchange*. <http://www.music-ir.org/mirex/>. Version: 2007
- [12] *Marsyas (Music Analysis, Retrieval and Synthesis for Audio Signals)*. <http://sourceforge.net/projects/marsyas/>. Version: 2008

- [13] *Diabetes Handy von LG Electronics.* <http://www.diabetes-kids.de/weitere-hilfsmittel>. Version: 3.1.2010
- [14] *stoll-tec consulting GmbH.* http://www.rhytmed.ch/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1. Version: 3.1.2010
- [15] *OMRON Medizintechnik Handelsgesellschaft mbH.* <http://www.omron-medizintechnik.de/blutdruckmessgeraete-oberarm.html>.
Version: Dezember 2009
- [16] *OMRON Medizintechnik Handelsgesellschaft mbH.* <http://www.omron-medizintechnik.de/blutdruckmessgeraete-handgelenk.html>.
Version: Dezember 2009
- [17] *boso.* <http://www.boso.de/Blutdruckmessgeraete-fuer-Patien.16.0.html>. Version: Oktober 2009
- [18] *VDE IT-Panel 2007.* www.vde.com. Version: September 2008
- [19] AEHNELT, Mario: Personalisierung als Schlüssel zum Erfolg. In: HAMBACH, S. (Hrsg.) ; URBAN, B (Hrsg.): *Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung -IGD-, Aussenstelle Rostock -EGD-: Multimedia & Bildung : Beiträge zu den 4. IuK-Tagen Mecklenburg-Vorpommern* Bd. Multimedia & Bildung, Fraunhofer IRB Verlag, 2003, S. 129–140
- [20] AKM ; DBMT ; KONSORTIALPARTNER: *Studie zur Situation der Medizintechnik in Deutschland im internationalen Vergleich. Studie im Auftrag des BMBF.* BMBF, 2005
- [21] ALBERS, Sönke ; SKIERA, Bernd: *Regressionsanalyse.* Wiesbaden : Gabler Verlag, 1999
- [22] ALDRIDGE, D.: An overview of music therapy research. In: *Complementary Therapies in Medicine* 2 (1994), S. 204–216
- [23] ALDRIDGE, D. ; ET.AL.: *Music therapy research: A review of references in the medical literature.* <http://www.musictherapyworld.de/modules/archive>

-
- [24] ALTENMULLER, E.: [Brain electrical correlates of cerebral music processing in the human]. In: *Eur Arch Psychiatry Neurol Sci* 235 (1986), Nr. 6, S. 342–54
- [25] ALTINSOY, E.: Virtuelle Realitäten als Instrument für psychoakustische Forschung. In: JEKOSCH, Prof. Dr. phil. U. (Hrsg.) ; HOFFMANN, Prof. Dr.-Ing. habil. R. (Hrsg.): *Fortschritte der Akustik: 34. Deutsche Jahrestagung für Akustik DAGA 08*. Dresden : Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 13355 Berlin, 2008
- [26] AMARAL, Carlos F.E. d. ; WOLF, Bernhard: Effects of Glucose in Blood and Skin Impedance Spectroscopy. In: *IEEE Africon*. Windhoek/Namibia : IEEE, 2007
- [27] ASAYAMA, Kei et a.: Use of 2003 European Society of Hypertension - European Society of Cardiology Guidelines for predicting stroke using self-measured blood pressure at home: The Ohsama study. In: *European Heart Journal* 26 (2005), S. 2026–2031
- [28] BAUMANN, Daniel: *Entwicklung eines softwaregesteuerten Analysetools für akustische Signale*, Studienarbeit, Heinz Nixdorf-Lehrstuhl für Medizinische Elektronik, Technische Universität München, 2006
- [29] BAUMANN, Daniel: *Entwicklung einer Aktivitätskarte*, Diplomarbeit, Heinz Nixdorf-Lehrstuhl für Medizinische Elektronik, Technische Universität München, 2008
- [30] BERDAHL, Edgar ; BURRED, Juan J.: *Grundfrequenzanalyse musikalischer Signale*. 2002
- [31] BERNARDI, L. ; GABUTTI, A. ; PORTA, C. ; SPICUZZA, L.: Slow breathing reduces chemoreflex response to hypoxia and hypercapnia, and increases baroreflex sensitivity. In: *J Hypertens* 19 (2001), Nr. 12, S. 2221–9
- [32] BERNARDI, L. ; PASSINO, C. ; WILMERDING, V. ; DALLAM, G. M. ; PARKER, D. L. ; ROBERGS, R. A. ; APPENZELLER, O.: Breathing patterns and cardiovascular autonomic modulation during hypoxia induced by simulated altitude. In: *J Hypertens* 19 (2001), Nr. 5, S. 947–58

- [33] BJARNASON-WEHRENS, Birna ; AL, et: *Clinical Research in Cardiology Supplements*. Bd. 4: *Leitlinie körperliche Aktivität zur Sekundärprävention und Therapie kardiovaskulärer Erkrankungen*. Springer, 2009
- [34] BRANDES, Vera: *Musiktherapie bei Bluthochdruck. Interview im B5 Gesundheitsmagazin, Bayerischer Rundfunk vom. 16.12.2007*
- [35] BRANDES, Vera ; MAIER, W. ; OTTOWITZ, G.: Funktionelle Musik zur Therapie essentieller Hypertonie - Bericht über eine Studie an der Paracelsus Medizinischen Privatuniversität Salzburg. In: *Musik-, Tanz- und Kunsttherapie* 17 (2006), Nr. 2, S. 62–67
- [36] BUNDESAMT:, Statistisches: *Todesursachen in Deutschland. Gestorbene in Deutschland an ausgewählten Todesursachen. 2006. – Forschungsbericht*
- [37] BURRED, Juan J. ; LERCH, Alexander: A Hierarchical Approach to Automatic Musical Genre Classification. In: *6th Int. Conference on Digital Audio Effects*. London : 6th Int. Conference on Digital Audio Effects, 2003
- [38] CANNON, W.: *The Wisdom of the Body*. New York : Norton, 1939
- [39] CLAUSS, J. ; SATTLER, M. ; SEEHER, W.D. ; WOLF, B.: In-vivo monitoring of bruxism with an intelligent tooth splint - Reliability and validity. In: SCHLEGEL, Olaf D. (Hrsg.) ; C., Wolfgang (Hrsg.): *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2009*. München : VDE Verlag GmbH, 2009, S. 108–111
- [40] CLYNES, Manfred ; MILSUM, J. H.: *Biomedical Engineering Systems*. New York : McGraw-Hill, 1970
- [41] COLLEEN, A.L. ; AL, et: Effect of Stimulative and Sedative Music on Systolic Blood Pressure, Heart Rate, and Respiratory Rate in Premature Infants. In: *Journal of Music Therapy* XXXI (1994), Nr. 2, S. 10–118
- [42] CONARD, Nicholas J.: *Die Anfänge der Kunst und Musik. Archäologische Spurensuche in der Schwäbischen Eiszeit. Vortrag*. München, 29.04.2008
- [43] DECKER-VOIGT, Hans-Helmut: *Aus der Seele gespielt*. München : Goldmann, 2000

-
- [44] DILL, Dieter ; GÜL, Murat ; SCHOLZ, Alexander ; BECKER, Sven ; BACHMEIER, M. ; WOLF, Bernhard: Implementation of a miniaturised activity monitor to support convalescence. In: SCHLEGEL, Olaf D. (Hrsg.) ; C., Wolfgang (Hrsg.): *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2009*,. München : VDE Verlag GmbH, 2009, S. 241–243
- [45] DOENECKE, D. ; KOOLMAN, J. ; FUCHS, G. ; GEROK, W.: *Physiologie*. 4. Urban Fischer Verlag, Elsevier, 2005
- [46] DOGIEL, Johann: Ueber den Einfluss der Musik auf den Blutkreislauf. In: *Archiv für Physiologie* (1880), S. 416–428
- [47] DOVAL, Boris ; RODET, Xavier: Estimation of Fundamental Frequency of Musical Sound Signals. In: *IEEE Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Toronto : IEEE Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1991
- [48] DOVAL, Boris ; RODET, Xavier: Boris Doval and Xavier Rodet. Fundamental Frequency Estimation and Tracking using Maximum Likelihood Harmonic Matching and HMMs. In: *IEEE Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Minneapolis : IEEE Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1993
- [49] DRISCHEL, Hans ; KÖRNER, Edgar: Informationsaufnahme, -verarbeitung und -speicherung sowie Steuerungsprozesse in Lebewesen. In: PHILIPPOW, Eugen (Hrsg.): *Taschenbuch der Elektrotechnik* Bd. 2. 3. Berlin : Verlag Technik, 1987, S. 939–973
- [50] DÜSING, R.: Therapietreue bei medikamentöser Behandlung. In: *Deutsche Medizinische Wochenschrift spezial* 131 (2006), Nr. 2
- [51] EBERHARD-METZGER, Claudia: Herz in Gefahr? / BMBF. 2006. – Forschungsbericht
- [52] EICHELBERG, Marco: Interoperability of Data Transmission of AAL Components. In: *Ein Workshop Interoperability of Data Transmission of AAL der Innovationspartnerschaft AAL*. München : VDE, BMBF, 2009
- [53] EISENBERG, D. M. ; DELBANCO, T. L. ; BERKEY, C. S. ; KAPTCHUK, T. J. ; KUPELNICK, B. ; KUHLE, J. ; CHALMERS, T. C.: Cognitive behavioral techniques

- for hypertension: are they effective? In: *Ann Intern Med* 118 (1993), Nr. 12, S. 964–72
- [54] ELLIS, Dan: Beat Tracking with Dynamic Programming. In: *MIREX 2006 Audio Beat Tracking Contest System Description*. 2006
- [55] ELLIS, Dan: Beat Tracking by Dynamic Programming. In: *J. New Music Research* 36 no.1 (2007), Nr. Special Issue on Beat and Tempo Extraction
- [56] ERTLE, Dagmar ; FAHLE, Anette: *Blutdrucksenkung mit Hypnose. Hypnotische Geschichten zur Blutdruckregulierung und -senkung*. CD. 2000
- [57] ESTER, Martin ; SANDER, Jörg: *Knowledge Discovery in Databases: Techniken und Anwendungen*. Springer, 2000
- [58] FAHRENBERG, Jochen ; FOERSTER, Friedrich: Kontrolliertes und interaktives Blutdruck-Monitoring: Neue Strategien und Ergebnisse. – Forschungsbericht
- [59] FASTL, Hugo ; ZWICKER, Eberhard: *Psychoacoustics - Facts and Models*. 3. Springer, 2007
- [60] FINK, Alexander: *Streß als Mitverursacher einer Hypertonie? Der Einfluß von Streßverarbeitungsstrategien und Streßverarbeitungsstilen auf die Entstehung und Aufrechterhaltung einer Hypertonie.*, Dissertation, Universität Salzburg, 1999
- [61] FINK, Gernot A.: 2003. Vieweg und Teubner Verlag, Mustererkennung mit Markov-Modellen
- [62] FLURSCHÜTZ, Thomas: *Evaluierung von Analysemethoden für musikalische Signale*, Studienarbeit, Heinz Nixdorf-Lehrstuhl für Medizinische Elektronik, Technische Universität München, 2007
- [63] FOLKOW, B.: Physiological aspects of primary hypertension. In: *Physiol Rev*. 62 (1982), S. 347–504
- [64] FRANKOWIAK, RSJ ; FRISTON, KJ ; FIRTH, CD ; DOLAN, RJ ; MAZZIOTTA, JC: *Human brain function*. London : Academic Press, 1997
- [65] FRIEDMAN, Jerome H.: Regularized discriminant analysis. In: *Journal of the American Statistical Association* 84 (1989), Nr. 405, S. 165–175

-
- [66] FRITZ, Florentina M.: Eine Methode zur Klassifizierung von Regelvorgängen biologischer und musikalischer Prozesse mit Hilfe eines künstlichen neuronalen Netzes und ihre Relevanz im Bereich der Musikwirkungsforschung. In: *Musik-, Tanz- und Kunsttherapie* 17 (2006), Nr. 2, S. 76–87
- [67] FÄHNRICH, Klaus-Peter ; NGONGA, Axel: *Adaptive Informationsauslieferung*. Universität Leipzig, 2002
- [68] GABRIELSSON, A. ; LINDSTRÖM, E.: The influence of musical structure on emotional expression. In: JUSLIN, P.N. (Hrsg.) ; SLOBODA, J.A. (Hrsg.): *Music and Emotions: Theory and Research*. New York : Oxford University Press, 2001, S. 223–248
- [69] GEIGER, Walter ; KOTTE, Willi: *Handbuch Qualität: Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements; Systeme, Perspektiven*. Vieweg+Teubner Verlag, 2005
- [70] GEMBRIS, H.: Forschungsprobleme der Musiktherapie. In: *Umschau* 4 (1987), S. 300–309
- [71] GEMBRIS, Heiner: *Grundlagen musikalischer Begabung und Entwicklung*. Wißner-Verlag, 1998
- [72] GEMBRIS, Heiner: Wie Musik auf den Menschen wirkt. Grevenbroich : Vortrag zur Jahrestagung der Interdisziplinären Studiengesellschaft für Praktische Psychologie, 1999
- [73] GEMBRIS, Heiner: Wirkungen von Musik - Musikpsychologische Forschungsergebnisse. In: *Mensch Musik* Bd. 51, Forum Musikpädagogik, 2002
- [74] GEORG, Christine: *Evaluation of bioacoustically effective sound patterns to influence metabolic and central nervous functions.*, Masterthesis, Heinz Nixdorf-Lehrstuhl für Medizinische Elektronik, Technische Universität München, 2008
- [75] GEVIRTZ, Richard N. ; LEHER, Paul: Resonant Frequency Heart Rate Biofeedback. In: SCHWARTZ, Mark S. (Hrsg.) ; ANDRASIK, Frank (Hrsg.): *Biofeedback. A Practitioner's Guide*. 3. New York : Guilford Press, 2003, S. 245–250

- [76] GIERRA, Kristiane ; KLINKENBERG, Norbert: *Entspannungsverfahren in Praktische Verhaltensmedizin*. Georg Thieme Verlag, 2005
- [77] GLOECKNER, N.: Psychophysiological investigation of emotional states evoked by music. In: *9th International Conference on Music Perception Cognition*. Rom : ICMPC, 2006
- [78] GRUBER, H.-G. ; WOLF, B. ; REIHER, M.: Innovation Barriers for Telemonitoring. In: SCHLEGEL, Olaf D. (Hrsg.) ; C., Wolfgang (Hrsg.): *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2009*. München : VDE Verlag GmbH, 2009, S. 48–50
- [79] GUYTON, A. C. ; HALL, J. E.: *Textbook of medical physiology*. 11. Philadelphia : Elsevier Saunders, 2006
- [80] GUYTON, A. C. ; JONES, C. E. ; COLEMAN, T. G.: *Circulatory Physiology: Cardiac Output and Its Regulation*. Philadelphia : Saunders, 1973
- [81] GUYTON, A.C.: *Circulatory Physiology III. Arterial Pressure and Hypertension*. Philadelphia : W. B. Saunders, 1980
- [82] HANDL, Andreas: *Multivariate Verfahren - Theorie und Praxis multivariater Verfahren unter besonderer Berücksichtigung von S-PLUS*. Springer, 2002
- [83] HARTUNG, Joachim ; ELPELT, Bärbel ; KLÖSENER, Karl-Heinz: *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2005
- [84] HATT, H.: [Nobel Prize for Medicine 2004. Olfaction: „lower sense” achieves high significance]. In: *Dtsch Med Wochenschr* 129 (2004), Nr. 46, S. 2458–60
- [85] HEINZ, Alexander ; FRIEDRICH, Petra ; CLAUSS, Johannes ; WOLF, Bernhard: Entwicklung einer vollautomatisierten Intervention für Biofeedback-Therapien. In: *BMT 2007 – 41. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Biomedizinische Technik (DGBMT) im VDE - Proceedings* Bd. 52. Aachen : Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 10785 Berlin, 2007
- [86] HELLBRÜCK, Jürgen ; ELLERMEIER, Wolfgang: *Hören: Physiologie, Psychologie und Pathologie*. 2. Göttingen, Bern, Toronto, Seattle : Hogrefe-Verlag, 2004

-
- [87] HERRMANN, Jörg M.: Essenzielle Hypertonie und Stress. Wann helfen Yoga, Psychotherapie und autogenes Training? In: *MMW Fortschritte Med* 144 (2002), S. 38–41
- [88] HERRMANN, Jörg M. ; DETREEE, Roberto: *Entspannung für einen niedrigen Blutdruck. CD*
- [89] HERRMANN, Jörg M. ; RÜDDEL, Heinz ; UEXKÜLL, Thure v.: Essentielle Hypertonie. In: *Psychosomatische Medizin*. 6. München : Urban Fischer, 2002, S. 845–861
- [90] HESSE, Horst-Peter: *Musik und Emotion. Wissenschaftliche Grundlagen des Musik-Erlebens*. Wien New York : Springer, 2003
- [91] HOCHDRUCKLIGA, Deutsche: DHL: Leitlinien zur Diagnostik und Behandlung der arteriellen Hypertonie. Heidelberg, 2005
- [92] HOFMANN, Daniel: *High-Level-Kontext Erkennung und Vorhersage auf Basis von Audiosignalen*. Dresden : Technische Universität Dresden, 2007 (Institut für Systemarchitektur)
- [93] HOFSTØY, Dan A. ; CLAUSS, Johannes ; WOLF, Bernhard: An intelligent implant system for monitoring and biofeedback therapy of snoring. In: SCHLEGEL, Olaf D. (Hrsg.) ; C., Wolfgang (Hrsg.): *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2009*. München : VDE Verlag GmbH, 2009, S. 196–199
- [94] HOSIE, J. ; WIKLUND, I.: Managing hypertension in general practice: can we do better? In: *J Hum Hypertens* 9 Suppl 2 (1995), S. S15–8
- [95] HYDE, I. M.: Effects of music upon electro-cardiograms and blood pressure. In: *Journal of Experimental Psychology* 7 (1924), S. 213–214
- [96] KALTENBACH, Martin: *Kardiologie kompakt*. Darmstadt : Dr. Dietrich Steinkopff Verlag, 2000
- [97] KAPTEINA, Hartmut: Einführung in die Musiktherapie. In: *Skriptum zur Vorlesung, Universität Siegen* (2008)

- [98] KEMPTER, Guido ; RITTER, Walter ; MAIER, Edith: Regelung der Innenraumbeleuchtung mit Hilfe von ambienten Benutzermonitoringsystemen. In: *Ambient Assisted Living 2. Deutscher Kongress*. Berlin : VDE Verlag GmbH, 2009
- [99] KHAN, M. Kashif S. ; AL-KHATIB, Was G.: Machine-learning based classification of speech and music. In: *Aus Multimedia Systems*. Springer, 2006
- [100] KHOO, Michael C. K.: *Physiological Control Systems: Analysis, Simulation, and Estimation*. John Wiley & Sons, 2000 (IEEE Press Series in Biomedical Engineering)
- [101] KNOBLOCH, S ; ZILLMANN, D: Mood management via the digital jukebox. In: *Journal of Communication* (2002), S. 351–366
- [102] KOELSCH, S. ; SIEBEL, W. A.: Towards a neural basis of music perception. In: *Trends Cogn Sci* 9 (2005), Nr. 12, S. 578–84
- [103] KOELSCH, Stefan: Ein neurokognitives Modell der Musikperzeption. In: *Musiktherapeutische Umschau* 26 (2005), Nr. 4, S. 365–381
- [104] KOHLER, Tom P.: *Über die Klassifizierung akustischer Interventionssequenzen bei essentieller Hypertonie*, Diplomarbeit, Heinz Nixdorf-Lehrstuhl für Medizinische Elektronik, Technische Universität München, 2008
- [105] KREMER, Martina: *ars auditus, Akustik-Gehör-Psychoakustik*. http://www.dasp.uni-wuppertal.de/ars_auditus. Version: September 2009
- [106] KREUZ, Deutsches G.: *Informationsportal für Gesundheit*. <http://www.dgk.de/gesundheit/herz-kreislauf-venen.html>. Version: Dezember 2009
- [107] KUHNERT, Klaus-Dieter ; STOMMEL, Martin: *Kurze Übersicht über verschiedene Lernverfahren, Unterlagen zu Digitale Bildverarbeitung II*. Siegen : Universität Siegen, 2003 (Fachbereich Echtzeit)
- [108] KÖLSCH, Stefan: Brain and Music. A contribution of central auditory processing with a new electrophysiological approach. 2000. – Forschungsbericht
- [109] LEHRER, Paul: *Biofeedback training to increase heart rate variability*. Vortrag. Eindhoven, 26.02.2009

-
- [110] LEHRER, Paul: *HRV - Background and Theory. Workshop*. Biofeedback Foundation of Europe. Eindhoven, 24.02.2009
- [111] LEMMER, B.: Clinical chronopharmacology of the cardiovascular system: hypertension and coronary heart disease. In: *Clin Ter* 157 (2006), Nr. 1, S. 41–52
- [112] LEMMER, B.: The importance of circadian rhythms on drug response in hypertension and coronary heart disease—from mice and man. In: *Pharmacol Ther* 111 (2006), Nr. 3, S. 629–51
- [113] LEMMER, Björn: Chronobiology and Chronopharmacology of Hypertension. In: WHITE, W.B. (Hrsg.): *Clinical Hypertension and Vascular Disease: Blood Pressure Monitoring in Cardiovascular Medicine and Therapeutics*. Totowa, NJ : Humana Press Inc., 2007, S. 413–435
- [114] LEVITIN, D. J. ; MENON, V.: Musical structure is processed in language areas of the brain: a possible role for Brodmann Area 47 in temporal coherence. In: *Neuroimage* 20 (2003), Nr. 4, S. 2142–52
- [115] LEVITIN, D. J. ; MENON, V. ; SCHMITT, J. E. ; ELIEZ, S. ; WHITE, C. D. ; GLOVER, G. H. ; KADIS, J. ; KORENBERG, J. R. ; BELLUGI, U. ; REISS, A. L.: Neural correlates of auditory perception in Williams syndrome: an fMRI study. In: *Neuroimage* 18 (2003), Nr. 1, S. 74–82
- [116] LI, Dongge ; AL., et: Classification of general audio data for content-based retrieval. In: *Pattern Recognition Letters* 22 (2001), S. 533–544
- [117] LI, Ming ; SLEEP, Ronan: Genre classification via an lz78-based string kernel. In: *6th International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR)*. London : 6th International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR), 2005
- [118] LOGAN, Beth: Mel Frequency Cepstral Coefficients for Music Modeling. In: *International Symposium on Music Information Retrieval (Music IR)*, 2000
- [119] M., Gül ; A., Scholz ; D., Dill ; ET.AL.: Telemetric Personal Health Monitoring Systems for Asthma and COPD. In: *NBC 14th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics*, 2008

- [120] MADISON, Guy: Perceptible Signals Giving an Impression of Continuous Pace Change. WO 2006/126956 A2 (2006)
- [121] MANDEL, Michael I. ; POLINER, Graham E. ; ELLIS, Daniel P.: Support vector machine active learning for music retrieval. In: *Multimedia-Systems* 12 (2006), Nr. 1, S. 3–13
- [122] MANNES, Elena: *Noten und Neuronen. Der Schlüssel zum Musikgefühl. Dokumentarfilm. Gesendet auf Arte am. 18.10.2009*
- [123] MAROUN, Dominik: *Technische Erprobung und Optimierung eines bioakustischen therapeutischen Feedbacksystems*, Masterthesis, Heinz Nixdorf-Lehrstuhl für Medizinische Elektronik, Technische Universität München, 2008
- [124] MARTENS, Jul: *Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2003
- [125] MARTIN, Alexandra: *Literaturrecherche Biofeedback am Fachbereich Psychologie der Philipps-Universität Marburg. 2006. – Forschungsbericht. – Stand: 23.10.09*
- [126] MARWITZ, Michael: Essenzielle Hypertonie. In: RIEF, Winfried (Hrsg.) ; BIRBAUMER, Niels (Hrsg.): *Biofeedback*. 2. Stuttgart : Schattauer, 2006, S. 46–72
- [127] MCGRADY, Angele ; LINDEN, Wolfgang: Biobehavioral Treatment of Essential Hypertension. In: SCHWARTZ, Mark S. (Hrsg.) ; ANDRASIK, Frank (Hrsg.): *Biofeedback. A Practitioner's Guide*. 3. New York : Guilford Press, 2003, S. 382–405
- [128] MCKINNEY, Martin F. ; BREEBAART, Jeroen: Features for Audio and Music Classification. In: *International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR)*, International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR), 2003
- [129] http://www.lme.ei.tum.de/intellitum_projekt.htm
- [130] MENGDEN, T. ; UN, S. ; TISSLER, A. ; DUSING, R. ; VETTER, H. ; ILLYES, M.: Die virtuelle Hypertonieklinik - Telemedizin im Management der arteriellen Hypertonie. [The virtual hypertension clinic–telemedicine in the management of arterial hypertension]. In: *Dtsch Med Wochenschr* 126 (2001), Nr. 47, S. 1335–41

- [131] MERRITT, Stephanie: *Die heilende Kraft der klassischen Musik*. Kösel Verlag, 1998
- [132] MEYER, Martin: *Signalverarbeitung: Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter*. Vieweg+Teubner Verlag, 2006
- [133] MIDDEKE, Martin: *Praktische Telemedizin am Beispiel der Herz-Kreislaufkrankungen*. Vortrag. München, 8.12.2009
- [134] MIDDEKE, Martin: *Arterielle Hypertonie*. Stuttgart New York : Georg Thieme Verlag, 2005
- [135] MIDDEKE, Martin: Sensorik für telemedizinische Anwendungen. In: GOSS, Franz (Hrsg.) ; MIDDEKE, Martin (Hrsg.) ; MENGDEN, Thomas (Hrsg.) ; SMETAK, Norbert (Hrsg.): *Praktische Telemedizin in Kardiologie und Hypertensiologie*. Stuttgart : Georg Thieme, 2009
- [136] MIDDEKE, Martin ; POSPISIL, Edita ; VÖLKER, Klaus: *Bluthochdruck senken ohne Medikamente*. 3. Stuttgart : TRIAS, 2002
- [137] MIERSWA, Ingo ; WURST, Michael ; KLINKENBERG, Ralf ; SCHOLZ, Martin ; EULER, Timm: Rapid prototyping for complex data mining tasks. In: UNGAR, Lyle (Hrsg.) ; CRAVEN, Mark (Hrsg.) ; GUNOPULOS, Dimitrios (Hrsg.) ; ELIASSI-RAD, Tina (Hrsg.): *KDD '06: Proceedings of the 12th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. New York, NY, USA : ACM, 2006, S. 935–940
- [138] MOECKEL, M. ; ROCKER, L. ; STORK, T. ; VOLLERT, J. ; DANNE, O. ; EICHSTADT, H. ; MULLER, R. ; HOCHREIN, H.: Immediate physiological responses of healthy volunteers to different types of music: cardiovascular, hormonal and mental changes. In: *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 68 (1994), Nr. 6, S. 451–9
- [139] MOELANTS, Dirk: Preferred Tempo Reconsidered. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Music Perception and Cognition*. Sydney : Proceedings of the 7th International Conference on Music Perception and Cognition, 2002
- [140] MONOD, Jacques: *Zufall und Notwendigkeit*. München : Piper Verlag, 1971

- [141] MOSS, Donald: *Workshop Fundamentals of Biofeedback*. Biofeedback Foundation of Europe. Salzburg, 19.02.2008
- [142] MOTTE-HABER, Helga de l.: Angewandte Musikpsychologie. In: *Funkkolleg Musik 2*. Fischer Taschenbuch Verlag, 1981, S. 91–116
- [143] MUSSGAY, Lutz: *Entspannungsverfahren (Hrsg): Das Praxishandbuch*. 3. Beltz PVU, 2004
- [144] MÜLLER, Meinard: *Information Retrieval for Music and Motion*. Springer, 2007
- [145] MÜLLER, Meinard ; APPELT, Daniel: Partielle Musiksynchronisation. In: *DAGA*. Dresden : DAGA, 2008
- [146] NIEUWENHUYS, R.: The greater limbic system, the emotional motor system and the brain. In: *Prog Brain Res* 107 (1996), S. 551–80
- [147] ORGANIZATION, World H.: International Society of Hypertension 1999 Guidelines for the Management of Hypertension. In: *Journal Hypertension* 17 (1999), S. 151–183
- [148] OVERBECK, Jan v.: Die Rolle der Telemedizin in der ambulanten Versorgung. In: *Arztpraxis der Zukunft*
- [149] OVERBECK, Jan v.: *Telemedizin und eHealth: Ein Hype?. Vortrag*. 16.6.2009
- [150] PAMPALK, Elias: *MA Toolbox for MATLAB – Manual*. <http://www.pampalk.at/ma/>. Version: 03.01.10
- [151] PAMPALK, Elias: Improvements of Audio-Based Music Similarity and Genre Classification. In: *Proceedings of the ISMIR International Conference on Music Information Retrieval*. London : Proceedings of the ISMIR International Conference on Music Information Retrieval, 2005
- [152] PAPE, W.: Brain and Music. Comments on Music-Related Brain Research. In: *Music Therapy Today* VI (2005), Nr. 2, S. 185–214
- [153] PEETERS, Georoy: A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the CUIDADO project. 2004. – Forschungsbericht

-
- [154] PELTONEN, Vesa ; AL., et: Computational auditory scene recognition. In: *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2 (2002)
- [155] PERANI, Daniela ; AL., et: Music in the first days of life. In: *Nature Proceedings* (2008)
- [156] PICKERING, T. G. ; GERIN, W. ; HOLLAND, J. K.: Home blood pressure teletransmission for better diagnosis and treatment. In: *Curr Hypertens Rep* 1 (1999), Nr. 6, S. 489–94
- [157] PIESBERGEN, P. ; MIDDEKE, Martin ; BUTELLO, W.: Online-Feedback des Blutdrucks mittels nichtinvasiver, kontinuierlicher Blutdruckmessung. In: *Nieren- und Hochdruckkrankheiten* 24 (1995), S. 154–156
- [158] PIRKER-BINDER, Ingrid: Biofeedback. Der Weg zu den inneren Ressourcen. In: *Promed Komplementär* 9 (2004), S. 14–20
- [159] POCOCK, G. ; RICHARDS, C.D.: *Human Physiology - The Basis of Medicine*. Oxford University Press, 2006
- [160] POLLARD, H.F. ; JANSSON., E.V.: A Tristimulus Method for the Specification of Musical Timbre. In: *Acustica* 51 (1982)
- [161] POLLER, Andreas: *Merkmalsextraktion für die Klassifikation von Bestandteilen in Dokument-Bildern*, Diss., 2005
- [162] PROCHASKA, J. O. ; DICLEMENTE, C. C.: Stages and processes of self-change of smoking: toward an integrative model of change. In: *J Consult Clin Psychol* 51 (1983), Nr. 3, S. 390–5
- [163] RAUCHHAUPT, Ulf v.: Die Erfindung der Musik. In: *Frankfurter Allgemeine Zeitung* 294 (16.12.2004), S. 33
- [164] RIEF, Winfried ; BIRBAUMER, Niels: Grundsätzliches zu Biofeedback. In: RIEF, Winfried (Hrsg.) ; BIRBAUMER, Niels (Hrsg.): *Biofeedback: Grundlagen, Indikationen, Kommunikation, praktisches Vorgehen in der Therapie*. 2. Stuttgart : Schattauer, 2006, S. 1–7

- [165] RINGELSTEIN, Erich B. ; KNECHT, Stefan: Bluthochdruck und isolierter systolischer Hypertonus - wichtigste Risikofaktoren des Schlaganfalls. In: *Deutsches Ärzteblatt* 103 (2006), Nr. 27, S. A 1906–11
- [166] ROHDENBURG, Thomas: *Klassifikation von Audio-Signalen*, Diss., 2003
- [167] RÖVER, Christian: *Musikinstrumentenerkennung mit Hilfe der Hough-Transformation.*, Diss., 2003
- [168] SCHIP, E. P. van h.: *Bild-Atlas „Innenohr“*. Hannover : Duphar Pharma, 1983
- [169] SCHMIDHUBER, M. ; WIEST, J. ; WOLF, B.: A mobile biosensor using living cells for water quality analysis. In: SCHLEGEL, Olaf D. (Hrsg.) ; C., Wolfgang (Hrsg.): *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2009*. München : VDE Verlag GmbH, 2009, S. 24–26
- [170] SCHMIDT, Robert F. ; AL., et: *Physiologie des Menschen*. Berlin, 2005
- [171] SCHMIDT, Robert F. ; THEWS, Gerhard ; LANG, Florian: *Physiologie des Menschen*. 28. Berlin Heidelberg New York : Springer, 2000
- [172] SCHRAMM, H ; VORDERER, P: Musikpräferenzen im Alltag. Ein Vergleich zwischen Jugendlichen und Erwachsenen. In: MÜLLER, R. (Hrsg.) ; GLOGNER, P. (Hrsg.) ; RHEIN, S. (Hrsg.) ; HEIM, J. (Hrsg.): *Wozu Jugendliche Musik und Medien gebrauchen. Jugendliche Identität und musikalische und mediale Geschmacksbildung*. Weinheim, München, Juventa, 2002, S. 112–125
- [173] SCHWARTZ, Mark S. ; ANDRASIK, Frank: *Biofeedback. A Practitioner's Guide*. 3. New York : Guilford Press, 2003
- [174] SCHÄFER, Heino ; WILD, Margarete ; MÜLLER, Jutta ; DEYNET, Uta ; HERRMANN, Jörg-Michael ; FAHRENBERG, Jochen: Das psychophysiologische Blutdruck-Video - ein neuer Zugang zur individuellen Blutdruckreaktivität und zum Selbstmanagement. In: *Praxis Klinische Verhaltensmedizin und Rehabilitation* 68 (2005), S. 61–70
- [175] SEELIGER, Jens: Telemonitoring Homecare. Overcoming AAL-Challenges. In: *Workshop Interoperability of data transmission of AAL der Innovationspartnerschaft AAL*. München : VDE BMBF, 2009

-
- [176] SIEGENTHALER, Walter: Geleitwort. In: *Arterielle Hypertonie*. Stuttgart : Georg Thieme Verlag, 2004
- [177] SILBERNAGL, Stefan ; DESPOPOULOS, Agamemnon: *Taschenatlas der Physiologie*. Bd. 6. Stuttgart : Georg Thieme, 1979 2003
- [178] SINEX, D. G. ; GUZIK, H. ; LI, H. ; HENDERSON SABES, J.: Responses of auditory nerve fibers to harmonic and mistuned complex tones. In: *Hear Res* 182 (2003), Nr. 1-2, S. 130–9
- [179] SKOWRONEK, Janto ; MCKINNEY, Martin F.: Perkussivität von Klängen als neues Merkmal zur Klassifikation von Musik-Genres. In: *Symposium Musikinformatik*, GI-Jahrestagung Bonn, 2005
- [180] SKOWRONEK, Janto ; MCKINNEY, Martin F.: *Intelligent Algorithms in Ambient and Biomedical Computing*. Springer Netherlands, 2006
- [181] SLANEY, Malcolm: *Auditory Toolbox Version 2 – Manual*
- [182] SPINTGE, Ralph: *Musik als Medizin: Bluthochdruck erfolgreich senken*. Stuttgart : TRIAS, 2003
- [183] SPINTGE, Ralph ; DROH, R.: *Music in Medicine*. Roche, 1984
- [184] SRINIVASAN, S.H. ; KANKANHALLI, Mohan: Harmonicity and dynamics-based features for audio. In: *IEEE ICASSP*, 2004
- [185] STRESE, Hartmut: *Ambient Assisted Living. Innovationsfeld im Rahmenprogramm „Mikrosysteme“ (2004-2009) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung*. <http://www.aal-deutschland.de/>. Version: 14.10.2009
- [186] TERHARDT, Ernst: *Akustische Kommunikation*. Springer, 1998
- [187] TUFFS, Annette: *Wie der Herzmuskel sich dem hohen Blutdruck anpasst*. <http://idw-online.de/pages/de/news57764>. Version: März 2008
- [188] TZANETAKIS, George: Tempo Extraction using Beat Histograms. MIREX Contest. 2005

- [189] TZANETAKIS, George ; ESSL, Georg: Human Perception and Computer Extraction of Musical Beat Strength. In: *5. Int. Conference on Digital Audio Effects*. Hamburg, 2002
- [190] TZANETAKIS, George ; ESSL, Georg ; COOK, Perry: Automatic Musical Genre Classification of Audio Signals. In: *International Symposium on Music Information Retrieval (ISMIR)*. Indiana, 2001
- [191] UHR, Wolfgang: *Wirtschaftsinformatik 2003, Band 2: Medien - Märkte - Mobilität*. Birkhäuser, 2003
- [192] ULM, Kurt: *Diskriminanzanalyse bei zeitabhängigen Beobachtungen*, Diss., 1980
- [193] VERNY, Thomas: *Das Seelenleben des Ungeborenen*. Rogner und Bernhard, 1981
- [194] VINCENT, S. ; THOMPSON, J.: The effect of music upon the human blood pressure. In: *The Lancet I* (1924), S. 534–537
- [195] VOLLERT, J. O. ; STORK, T. ; ROSE, M. ; MOCKEL, M.: [Music as adjuvant therapy for coronary heart disease. Therapeutic music lowers anxiety, stress and beta-endorphin concentrations in patients from a coronary sport group]. In: *Dtsch Med Wochenschr* 128 (2003), Nr. 51-52, S. 2712–6
- [196] WALAWALKAR, L. ; YEASIN, Mohammad ; NARASIMHAMURTHY, Anand M. ; SHARMA, Rajeev: Support vector learning for gender classification using audio and visual cues: A comparison. In: LEE, Seong-Whan (Hrsg.) ; VERRI, Alessandro (Hrsg.): *First International Workshop SVM*. Springer, 2002
- [197] WEFERS, Frank ; SCHRÖDER, Dirk: Real-time filtering structures for interactive geometry modification in acoustic virtual reality. In: *International Conference on Acoustics NAG/DAGA 2009*. Rotterdam : Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Berlin, 2009, 2009, S. 1592–1595
- [198] WENDICKE, Kerstin: *Optimierung von Stimulationsspulen für die induktive Nervenreizung*, Dissertation, Heinz Nixdorf-Lehrstuhl für Medizinische Elektronik, Technische Universität München, 2008

-
- [199] WENGER, Christian: „50: Wertewandel, Bedürfnisse und Wachstumsmärkte in 2017“. In: *Ambient Assisted Living 2. Deutscher Kongress*. Berlin : VDE Verlag GmbH, 2009
- [200] WHITE, W. B.: Ambulatory blood-pressure monitoring in clinical practice. In: *N Engl J Med* 348 (2003), Nr. 24, S. 2377–8
- [201] WIENER, Norbert: *Cybernetics: Control and Communication in the Animal and the Machine*. New York : Wiley, 1961
- [202] WILLETT, Daniel: *Beiträge zur statistischen Modellierung und effizienten Dekodierung in der automatischen Spracherkennung*, Diss., 2000
- [203] WILLIAMS, Bryan ; AL., et: British Hypertension Society Guidelines. Guidelines for management of hypertension: report of the fourth working party of the British Hypertension Society. In: *Journal of Human Hypertension* 18 (2004), S. 139–185
- [204] WOLF, Bernhard: Eine Methode zur drahtlosen Messung der Atemfrequenz an Säuglingen. In: *Separatum EXPERIENTIA* 32 (1976), Nr. 9, S. 1217–1218
- [205] WOLF, Bernhard: Einrichtung zur Früherkennung von kritischen Gesundheitszuständen, insbesondere bei Risikopatienten. DE 100 06 598 A1 (2001)
- [206] WOLF, Bernhard: Mobilfunk-gestützte medizinische Wissensbasis mit sensorisch interaktiven Mobiltelefonen. In: *Biomedizinische Technik, health technologies 2* (2005), S. 156–158
- [207] WOLF, Bernhard ; CLAUSS, Johannes ; FRIEDRICH, Petra ; GRUBER, Hans-Georg ; SCHOLZ, Alexander: Telematische medizinische Systeme für die individualisierte und personalisierte Assistenz. In: *ntz* 1 (2009), S. 14–17
- [208] WOLF, Bernhard ; FRIEDRICH, Petra ; SPITTLER, Thomas ; CLAUSS, Johannes ; SCHOLZ, Alexander ; TÜBINGER, Stefan ; TIEDGE, Winfried: Ambient Medicine® - Sensorik, Schnittstellen und Auswertung für telematische Diagnose und Therapie. In: *Telemonitoring in Gesundheits- und Sozialsystemen. Eine eHealth Lösung mit Zukunft. Tagung des Münchener Kreis*. München : Günter Braun Jörg Eberspächer, 2009

- [209] WOLF-MAIER, Katharina ; AL., et: Hypertension prevalence and blood pressure levels in 6 European Countries, Canada and the United States. In: *The Journal of the American Medical Association* 289 (2003), S. 2363–2369
- [210] ZIERAU, Heike ; SPODAREV, Evgeny: *Andere Methoden zur Klassifikation und Objekterkennung, Seminar Statistische Lerntheorie und ihre Anwendungen*. Ulm : Universität Ulm, 2007 (Institute für Stochastik, Zahlentheorie und Wahrscheinlichkeitstheorie)
- [211] ZWICKER, Eberhard: *Psychoakustik*. Springer, 1982
- [212] ZWICKER, Eberhard ; FELDTKELLER, Richard: *Das Ohr als Nachrichtempfänger*. Stuttgart : Hirzel-Verlag, 1967

