Humanize: Neurowissenschaftliche Messmethoden zu menschen-zentrierten Innenstadtkonzepten

Kyra Voll, Jonas Rau, Hans Amberg und Andreas Pfnür

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT
Forschungscenter Betriebliche Immobilienwirtschaft

Prof. Dr. Andreas Pfnür (Hrsg.)
Institut für Betriebswirtschaftslehre
Fachgebiet Immobilienwirtschaft
und Baubetriebswirtschaftslehre
www.immobilien-forschung.de

Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis,
Band Nr. 58, Juli 2025

Zitierempfehlung:

Kyra Voll, Jonas Rau, Hans Amberg und Andreas Pfnür (2025): Humanize: Neurowissenschaftliche Messmethoden zu menschenzentrierten Innenstadtkonzepten. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 58, Technische Universität Darmstadt.

Autor*innen:

Kyra Voll, M. Sc., Wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin am Fachgebiet Immobilienwirtschaft und Baubetriebswirtschaftslehre an der Technischen Universität Darmstadt. voll@bwl.tu-darmstadt.de

Jonas Rau, M. Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Fachgebiet Immobilienwirtschaft und Baubetriebswirtschaftslehre an der Technischen Universität Darmstadt. rau@bwl.tu-darmstadt.de

Hans Amberg, B. Sc., Hilfswissenschaftler am Fachgebiet Immobilienwirtschaft und Baubetriebswirtschaftslehre an der Technischen Universität Darmstadt. hans.amberg@stud.tu-darmstadt.de

Prof. Dr. Andreas Pfnür, Leiter des Fachgebiets Immobilienwirtschaft und Baubetriebswirtschaftslehre an der Technischen Universität Darmstadt und Gründer des Forschungscenters Betriebliche Immobilienwirtschaft. pfnuer@bwl.tu-darmstadt.de

Die nachfolgende Studie wurde unterstützt durch:

Kontakt:
Dr. Benjamin Wagner
Head of Corporate Development, Innovation & ESG
benjamin.wagner@midstad.com

Die Arbeit ist der Beitrag der TU Darmstadt zum Forschungsnetzwerk initiiert durch Midstad zur Transformation deutscher Innenstädte.

Die Arbeit gibt die Sicht der Autor*innen wieder.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Studie mitunter auf die gleichzeitige Verwendung geschlechterspezifischer Sprachformen verzichtet, sondern stattdessen zum Beispiel das generische Maskulinum verwendet; dabei gelten sämtliche Personenbezeichnungen jeweils gleichermaßen für alle Geschlechter. Die Wahl dieser verkürzten Sprachformen hat lediglich redaktionelle Gründe und beinhaltet keine Wertungen.

Forschungscenter Betriebliche Immobilienwirtschaft FBI

Impressum (V.i.S.d.P)

Prof. Dr. Andreas Pfnür
Fachgebiet Immobilienwirtschaft und Baubetriebswirtschaftslehre
Fachbereich Rechts- und Wirtschaftswissenschaften
Technische Universität Darmstadt
Hochschulstr. 1
64289 Darmstadt

Telefon	+49 (0) 6151/16 – 24510
Telefax	+49 (0) 6151/16 – 24519
E-Mail	office-bwl9@bwl.tu-darmstadt.de
Homepage	www.real-estate-research.org
ISSN-Nr.	1862-2291

Juli 2025

Management Summary

Städte und insbesondere Innenstädte dienen Menschen als Orte zur Erfüllung diverser Daseinsgrundfunktionen, wie Wohnen, Arbeiten, Versorgung, und zur Freizeitgestaltung. In den vergangenen Jahrzehnten haben sich die Rahmenbedingungen von Städten jedoch massiv verändert, wodurch ein wachsender Transformationsbedarf ausgelöst wird. Während sich in einigen Städten der Welt, wie dem australischen Melbourne, welche seit Jahren unter den Top 3 im Ranking der lebenswertesten Städte wiederzufinden ist, Ortsvorsteher zunehmend darüber austauschen, welche Qualitäten die Stadt liebenswert und lebenswert für die Bevölkerung machen, dominieren in deutschen Innenstädten häufig die Anpassungsbedarfe ohne konkrete Handlungsstrategien. Dies führt im Ergebnis dazu, dass die Kluft zwischen der gebauten Umwelt in Innenstädten und den menschlichen Bedürfnissen auseinanderklafft. Im Diskurs zu deutschen Innenstädten wird deshalb immer wieder die schlechte Aufenthaltsqualität, welche infolge mangelhafter menschenzentrierten Gestaltungsentscheidungen entstanden ist, betont (Pfnür, Rau, 2023). Konkret geben 78 % der Innenstadtbesucher an, dass die Innenstadt kein oder ein nicht ausreichend positives Sinneserlebnis bietet und für 75 % mangelt es in der Innenstadt an Berücksichtigung des menschlichen Maßstabs. Diese Einschätzung zieht sich durch alle gesellschaftlichen Schichten (Pfnür, Rau, 2024a). Das liegt unter anderem daran, dass zur Entwicklung von Ansätzen zur Transformation der Innenstädte ein tiefgehendes Verständnis darüber fehlt, wie Bürger den städtischen Raum erleben, nutzen und empfinden. Neuere Ansätze verfolgen das Ziel, ein Verständnis darüber mithilfe von Umfragen aufzubauen. Obwohl die gewonnenen Erkenntnisse wertvolle Beiträge zur Transformation der Innenstadt leisten, bleiben die den Antworten der Befragten vorgeschalteten kognitiven Prozesse weiterhin eine Blackbox. Während des Projektentwicklungsprozesses wird meist auf das Bauchgefühl und auf Erfahrungswerte aus alten Projekten gesetzt. Durch die langen Feedbackzeiten bis nach dem Immobiliengestehungsprozess sind die Erfahrungswerte aber häufig nicht direkt auswertbar, werden subjektiv bewertet, und kausale Zusammenhänge zwischen beobachtetem Effekt und Designwahl sind nicht immer eindeutig. Dies stellt Projektentwickler regelmäßig vor erhebliche Herausforderungen, menschengerechte Gebäude zu bauen. Zur Beantwortung der Frage, worin sich lebenswerte, menschliche Orte von weniger lebenswerten Immobilien und Städten unterscheiden, bedarf es folglich wissenschaftlicher Untersuchungen der Zusammenhänge auf Basis belastbarer Daten.

Unterschiedliche Fachdisziplinen beschäftigen sich mit der Messung und Erfassung von menschlichen Wahrnehmungen und Verhaltensweisen. Diese Erhebungen können sowohl auf Basis subjektiver Einschätzungen von Befragten als auch mithilfe objektiver Messmethoden durchgeführt werden. Während selbst berichtete Daten jedoch dem Risiko unterliegen, durch Störungen oder Verfälschungen negativ beeinträchtigt zu sein, unterliegen Daten, die aus standardisierten Verfahren gewonnen werden, weniger Einschränkungen. Bisweilen mangelt es in der immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis jedoch am Einsatz solch objektiverer neurowissenschaftlicher Methoden. Ein Überblick über mögliche Methoden zur

Messung menschlicher Wahrnehmungen und menschlichen Verhaltens im Kontext von Innenstädten steht bislang aus. Die Grundlage dafür legt diese Studie mit einer breit angelegten Literaturrecherche über Messmethoden, welche in unterschiedlichen Forschungsfeldern eingesetzt werden, um Verhalten und Wahrnehmungen zu erheben. Basierend darauf kann betrachtet werden, welche Verfahren und Methoden zur Messung bislang bereits in der Stadtforschung eingesetzt werden. Außerdem ermöglicht es eine Analyse, die aufzeigt, welche Methoden auf den Kontext übertragen werden können, um zu fundierteren und effektiveren städtischen Planungs- und Gestaltungsprozessen beizutragen.

Der Zweck dieser Studie ist es deshalb, einen Überblick über bisherige Messmethoden menschlicher Wahrnehmung und Erfassung der Umwelt zu erhalten. Es werden Technologien und Methoden unterschiedlicher Anwendungsfelder aufgezeigt und die Übertragbarkeit auf den Kontext von Städten und ihren Immobilien analysiert. Während die Ergebnisse in der Praxis dabei helfen, Sicherheiten für die Entscheidungsfindung bei Projektentwicklungen in Innenstadtlagen zu bieten, beziehungsweise Entscheidungsgrundlagen für eine zukunftsgerichtete Innenstadtpolitik zu generieren, können offene wissenschaftliche Fragestellungen identifiziert und neue Forschungsbedarfe abgeleitet werden.

Es erfolgt zunächst eine kurze Darstellung des Strukturwandels in Innenstädten und der Möglichkeit mittels neurowissenschaftlichen Betrachtungsweisen einen Fortschritt in immobilienwirtschaftlicher Forschung und Praxis zu erzielen. Anschließend werden die Begriffe menschliche Wahrnehmung und Verhaltensweisen mithilfe der Kognitionswissenschaft beleuchtet. Darauf aufbauend werden die Ergebnisse der Literaturrecherche dargestellt und abschließend die Übertragbarkeit auf den Innenstadtkontext herausgearbeitet.

Die semi-strukturierte Literaturrecherche zeigt, dass besonders die Methoden zur Messung der neurologischen und physiologischen Aktivität das Potenzial besitzen, die Blackbox zwischen Umgebung und menschlicher Reaktion darauf zu entschlüsseln. Bisherige Ansätze, wie Umfragen und Interviews, können durch die objektiveren Methoden ergänzt werden, um Erkenntnislücken zu schließen. Sie liefern teils weitreichende Einblicke in menschliche Wahrnehmungen und Verhaltensweisen und unterliegen nicht denselben Limitationen und Bias. Damit können diese Methoden eine entscheidende Erweiterung des Repertoires der immobilienwirtschaftlichen Forschung darstellen, welche insbesondere entscheidend für die erfolgreiche Transformation von Innenstädten wird. Zusätzlich können durch die Anwendung dieser Technologien in Stadtplanung und Projektentwicklungen Innenstädte menschengerechter gestaltet werden. Darüber hinaus zeigt die Studie auf, dass neurowissenschaftliche und physiologische Messmethoden ein bislang ungenutztes Potenzial bieten, um die soziale Dimension (S) von ESG im Kontext der Projektentwicklung systematisch zu erfassen. Die Anwendung solcher Methoden kann Projektentwicklern helfen, gesellschaftliche Akzeptanz sowie die Auswirkungen von Gebäudevolumen, architektonischem Design sowie Raumkonzepte messbar zu machen – ein zentraler Faktor für Planungssicherheit, insbesondere bei komplexen oder gemischt genutzten Vorhaben.

Gleichzeitig bietet dieser datenbasierte Zugang einen strategischen Vorteil in Aushandlungsprozessen mit Kommunen, Investoren und weiteren Stakeholdern, da der soziale und damit auch langfristige wirtschaftliche Mehrwert eines Projekts nachvollziehbar und evidenzbasiert dargestellt werden kann.

Um einen realen Beitrag zur Transformation der Innenstädte zu leisten, ist eine wohlüberlegte, fallabhängige Mischung der Methoden notwendig. Beispielsweise können geplante Projektentwicklungen mittels virtueller Realität vor ihrer baulichen Umsetzung getestet werden. Zur Messung und Auswertung der kognitiven und physiologischen Reaktion empfiehlt sich eine Kombination verschiedener Methoden wie Eyetracking, mobilem EEG mit bspw. Messung der Hautleitfähigkeit. Zur Prüfung von Bestandsbebauung bietet sich ein breites Spektrum an mobilen Lösungen zur Messung der menschlichen Wahrnehmungen und Reaktionen an. Mithilfe bspw. von Eyetracking mit fNIRS in Verbindung mit der Messung der Herzfrequenzvariabilität können vor Ort wertvolle Informationen über einzelne natürliche oder bauliche Elemente und ihre Wirkung auf Stress und andere Emotionen gemessen werden. Diese Daten helfen, fundierte, menschengerechte Entscheidungen bei der Gestaltung von Innenstädten zu treffen. Die Entscheidung für oder gegen spezifische Messmethoden und letztendlich die Methodenkombination muss dabei stets von mehreren Blickwinkeln beurteilt und in Abhängigkeit des jeweiligen Zwecks maßgeschneidert an die konkrete Fragestellung angepasst werden. Insgesamt verdeutlicht die Studie, dass die Kombination neurowissenschaftlicher Messmethoden nicht nur einen wissenschaftlichen, sondern auch einen praktischen Mehrwert bietet. Sie ermöglicht es, fundierte und datengestützte Entscheidungen für die Zukunft von Innenstädten zu treffen, die sowohl in der Stadtplanung als auch bei der Gestaltung öffentlicher Räume und der Projektentwicklung von großem Nutzen für alle Akteure sind.

Keywords: Messung menschlicher Wahrnehmung und Verhaltensweisen, Kognitionswissenschaft; Neurowissenschaften, Transformation Innenstädte

Inhaltsverzeichnis

Management Summary III

Abbildungsverzeichnis IV

Tabellenverzeichnis VI

Abkürzungsverzeichnis VII

1 Einführung 1

1.1 Problemstellung 1

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Literaturstudie 2

2 Kontext und Begriffsbestimmung 5

2.1 Zusammenspiel von Menschen und Immobilien 5

2.2 Transformationsbedarf deutscher Innenstädte und Werkzeuge der Entwicklung und Gestaltung 8

2.3 Neurowissenschaften und der Status quo der Neurourbanistik 10

2.4 Embodiment-These der Kognitionswissenschaft untersuchen das Zusammenspiel menschlicher Wahrnehmung und Verhaltensweisen 13

2.5 Ansatz zur Strukturierung der Methoden in dieser Studie basierend auf dem kognitiven System 14

3 Methodisches Vorgehen 16

3.1 Studienkonzeption und wissenschaftliche Vorgehensweise 16

3.2 Hinweise zum Auswertungskonzept 17

4 State-of-the-Art Messmethoden 19

4.1 Methoden zur Abbildung der Umwelt 21

4.1.1 Erweiterte Realität vor Ort simulieren 21

4.1.2 Virtuelle Laborbedingungen schaffen 22

4.2 Erfassung von (Verhaltens-)Reaktionen 23

4.2.1 Fokus auf Menschengruppen 23

4.2.2 Fokus auf Individuen 25

4.3 Erfassung menschlicher Wahrnehmung 33

4.3.1 Methoden mit Fokus auf einzelne Sinne 33

4.3.2 Messen multimodaler Wahrnehmungen und Synästhesie 39

4.4 Vermessen der menschlichen Psyche 41

4.4.1 Messung von Gehirnaktivitäten 41

4.5 Methoden zur Vermessung des Körpers (Physiologie) 59

4.5.1 Methoden zur Vermessung der Haut 59

4.5.2 Messmethoden des Herz-Kreislauf-Systems 61

4.5.3 Methoden zur Vermessung der Muskeln 65

5 Übertragbarkeit der Messmethoden zur Entwicklung menschenorientierter Innenstadtkonzepte 69

5.1 Methodenbaukasten 70

5.2 Potenzialabschätzung der Methoden 73

5.3 Mögliche Anwendungsszenarien im Entstehungsprozess 78

5.3.1 Wirkung von Materialität und Holzoberflächen auf Nutzererleben und Wohl- befinden 78

5.3.2 Ermittlung der optimalen Belegungsraten und Raumlayouts in der Projektentwicklung 80
5.3.3 Neurologische und physiologische Messung des „S“ in ESG 82
6 Fazit und Ausblick 86
Literaturverzeichnis i

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Exemplarische Darstellung externer Einflüsse auf den Immobiliennutzer (Eigene Darstellung, 2024) 8

Abbildung 2: Spektrum der Neurowissenschaften (in Anlehnung an Camargo et al., 2021, S. 12-13) 9

Abbildung 3: The scale of neuroscience (Camargo et al., 2021) 12

Abbildung 4: Vom Aufkommen der Kognitionswissenschaft bis zur Embodiment-These (eigene Darstellung, 2024) 13

Abbildung 5: Kognitives System (eigene Darstellung, 2024) 14

Abbildung 6: Anknüpfungspunkte im kognitiven System und exemplarische Messmethoden (eigene Darstellung, 2024) 15

Abbildung 7: Sukzessives wissenschaftliches Vorgehen (eigene Darstellung, 2024) 16

Abbildung 8: Beispiel einer Eyetracking-Brille (Rey, 2024) 35

Abbildung 9: Beispiele von Lärmkarten zu a) Autobahnverkehr, (b) örtlicher Straßenverkehr, (c) Eisenbahnverkehr. (Coensel et al., 2010) 36

Abbildung 10: Beispiel einer Klassifizierung typischer Geräusche in städtischen Freiräumen (Zhang/Kang, 2007) 37

Abbildung 11: Objekttypen des haptischen Objekterkennungstests (Kalisch, 2012) 39

Abbildung 12: Beispielhafter Apparat für die Zwei-Punkt-Diskrimination (OPC Health,2024) 39

Abbildung 13: Beispielhafte Illustration der LFP Aufzeichnung (Yin et al., 2021) 41

Abbildung 14: Schematische Darstellung einer Serie des Wisconsin Card Sorting Tests (Barceló, 2001) 43

Abbildung 15: Beispiel einer exemplarischen Präsentation der Wörter in einem EST (Bauknecht, 2024) 44

Abbildung 16: Beispielhafte Darstellung von aktivierten Hirnarealen (Kim et al., 2010) 46

Abbildung 17: Schema der Injektion, Photonenemission und des PET-Scan-Vorgangs (Tay/Piccini, 2004) 48

Abbildung 18: Prototypenkonzept eines ambulanten Helm-PET (Bauer et al., 2016) 48

Abbildung 19: Kernspintomograf (Universitätsklinikum Heidelberg, 2024) 49

Abbildung 20: Beispielbild eines DTI-Ergebnisses (Universitätsklinikum Heidelberg, 2024) 50

Abbildung 21: SPECT Scan (Medmovie, 2024) 51

Abbildung 22: Taktile Stimulation des Mittelfingers der linken Hand löst eine charakteristische Antwort des Gehirns aus (Braun, 2007) 53

Abbildung 23: Schematische Darstellung des Magnetfeldes, erzeugt durch die TMS-Spule (Barroso et al., 2019) 55

Abbildung 24: Beispiel eines Probanden während des mobilen EEG-Experiments (Mavros et al., 2016) 57

Abbildung 25: Beispiel mobiler EEG-Geräte (Mbt, 2024) 57

Abbildung 26: Möglicher Aufbau eines Feldversuches mit fNIRS (Kopton/Kenning, 2014) 59

Abbildung 27: Beispielhafter Messaufbau 1 (Engelniederhammer et al., 2019) 61

Abbildung 28: Beispielhafter Messaufbau 2 (Pierański/Berčík, 2021) 61
Abbildung 29: Darstellung einer beispielhaften Berechnung der RMSSD-Verteilung (Agustí et al., 2022) 63
Abbildung 30: Beispiel einer Testperson mit benutzerdefinierter Sensorausrüstung und tragbarer Kamera (Görgül//Yıldız Özkan, 2024) 63
Abbildung 31: Schematische Darstellung des Grundkonzepts von Biosensoren (Schmid/Bilitewski, 1992) 65
Abbildung 32: Schematische Darstellung von zukünftigen Entwicklungen im Bereich tragbarer Biosensoren (Karuppaiah et al., 2023) 65
Abbildung 33: Schematische Darstellung eines EMG mit unterschiedlichen Elektroden (Cleveland Clinic, 2023) 67
Abbildung 34: Beispiel der Anbringung von FEMG-Elektroden (Lu et al., 2023) 68
Abbildung 35: Integration der Methoden in die schematische Darstellung des kognitiven Systems (eigene Darstellung, 2024) 71
Abbildung 36: Exemplarische Darstellung einer möglichen Studiendurchführung mit VR, Eyetracking, HVR, GSR, EMG und Umfrage (eigene Darstellung, 2024 in Anlehnung an Ergan et al., 2018) 82
Abbildung 37: Beispielhafter Ablauf einer Studienvorbereitung (eigene Darstellung, 2025) 83
Abbildung 38: Mögliche Testausprägungen (eigene Darstellung, 2025 in Anlehnung an Ergan et al., 2018) 84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Methodenübersicht 19
Tabelle 2: Potenziale und Grenzen der Methoden (eigene Darstellung, 2024) 75

Abkürzungsverzeichnis

bspw.	beispielweise
bzw.	beziehungsweise
CT	Computertomografie
DTI	Diffusion Tensor Imaging
EDA	Elektrodermale Aktivität
EEG	Elektroenzephalogramm
EKG	Elektrokardiogramm
EMG	Elektromyografie
eng.	englisch
FEMG	Facial Electromyography
fMRT/fMRI	Funktionelle Magnetresonanztomografie
fNIRS	funktionale near-Infrared-Spektroskopie
GEMA	Geographical Ecological Momentary Assessment
GIS	Geografische Informationssysteme
GSR	Galvanische Hautreaktionen
HRV	Herzfrequenzvariabilität
MRT/MRI	Magnetresonanztomografie
NIRS	Nahinfrarotspektroskopie
OEMG	Oberflächen-Elektromyografie
PET	Positron Emission Tomography
RMSSD	Root Mean Square of Successive Differences
sog.	sogenannte
SPECT	Single Photon Emission Computed Tomography
UCL	University College London
WCST	Wisconsin Card Sorting Test
z. B.	zum Beispiel

1 Einführung

1.1 Problemstellung

Wirtschaft und Gesellschaft befinden sich in einem tiefgreifenden Wandel. Bedingt durch Megatrends wie beispielsweise das wachsende Umwelt- und Gesundheitsbewusstsein, die Digitalisierung und die (Re-)Urbanisierung entstehen neue soziale Rahmenbedingungen, welche mit großen Unsicherheiten für gesellschaftliche Akteure und Unternehmen einhergehen. Gleichzeitig wächst die Notwendigkeit, bestehende Gegebenheiten immer wieder und zunehmend schneller an sich verändernde Umweltbedingungen anzupassen. So haben sich in den vergangenen Jahrzehnten auch die Rahmenbedingungen von Städten massiv verändert. Zusätzlich katalysiert durch die Covid-19 -Pandemie wächst der Transformationsbedarf und legt in vielen Innenstädten eine fehlende Resilienz gegenüber den sich verändernden Anforderungen offen. Ohne den notwendigen Wandel sorgen viele Städte für hohe menschliche Kosten, da sie die Krise der psychischen Gesundheit, mit der sie konfrontiert sind, nicht bewältigen können (Camargo et al., 2021). Die Gründe hierfür finden sich in der immer größer werdenden Kluft zwischen der Reißbrettästhetik und einem menschengerechten Layout, welches die menschliche Perspektive auf die gebaute Umwelt berücksichtigt. Ein omnipräsenter Kritikpunkt im Diskurs um die deutschen Innenstädte ist die schlechte Aufenthaltsqualität, welche aus mangelhaften menschenzentrierten Gestaltungsentscheidungen entstanden ist (Pfnür, Rau, 2023). So geben 78 % der Innenstadtbesucher an, dass die Innenstadt kein oder ein nicht ausreichend positives Sinneserlebnis bietet, und für 75 % mangelt es in der Innenstadt an Berücksichtigung des menschlichen Maßstabs. Diese Einschätzung zieht sich durch alle gesellschaftlichen Schichten (Pfnür, Rau, 2024a). Einige Kritiker gehen sogar so weit, dass sie dem Bestand an Gebäuden und öffentlichem Raum der Moderne eine ruinierende Wirkung der Wirtschaft und Gesellschaft in vielen Städten zuschreiben (Heatherwick, 2023). Denn neben der Wertminderung von Immobilien, niedrigeren Mietpreisen und hohen Leerstandsquoten sinkt auch die Attraktivität für Unternehmen, in diesen Städten zu agieren. Auch für die Bewohner und Besucher der Innenstädte mangelt es an Lebensqualität. Durch die immer gleichen modernen Strukturen weltweit, welchen es häufig an ästhetischen Qualitäten mangelt, geht vielen Städten die Fähigkeit verloren, ein individuelles Gefühl dafür zu vermitteln, wo auf der Welt sich diese befindet. Stattdessen bringen die Städte negative gesundheitliche Auswirkungen für die BürgerInnen mit sich, fördern soziale Ungleichheit und eine geringere Gemeinschaftsbildung.

Mit den Erkenntnissen zur Notwendigkeit einer Veränderung der Städte wächst zeitgleich die Frage nach der Ausgestaltung dieser Transformation. Wie gelingt eine emotionale und

sinnvolle Verbindung zwischen den Menschen und ihrem urbanen Umfeld? Nur die Beantwortung dieser Frage kann den Weg dafür bereiten, lebenswerte Innenstädte zu entwickeln. Die vorliegende Studie geht diese Fragestellung aus einer übergeordneten Perspektive an. Hypothetisch bedarf es bei menschenzentriertem Design von städtischen Gebäuden und Räumen, in dem Wohlbefinden und Interaktion der Stadtbewohner entstehen kann, kreativer und durchdachter Architektur und funktionaler und ästhetischer Aspekte. Diese Perspektive ist nicht neu, sondern bereits durch umfangreiche Arbeiten zur Theorie der Menschenzentrierung geformt (Camargo et al., 2021). Diese Fragestellung wurde bereits mit mithilfe traditioneller Befragungsmethoden zur Genüge zu ergründen versucht. Doch wie läuft die Wahrnehmung von Immobilien beim Menschen tatsächlich ab? Die kognitiven Prozesse, die den Antworten in klassischen Erhebungsmethoden vorgeschaltet sind, bleiben dabei jedoch eine Blackbox. Um diese Frage zu beantworten, gilt es zu verstehen, wie BürgerInnen Gebäude und den städtischen Raum erleben, nutzen und empfinden, welche Bedarfe sie für die (Innen-)Stadt haben und welche Reaktionen bei ihnen hervorgerufen werden. Erst wenn diese Blackbox entschlüsselt wird, kann erklärt werden was und warum Menschen in der Stadt machen und brauchen. Doch Wissen über das Zustandekommen der Wahrnehmungen, Empfindungen und Reaktionen kann nur mithilfe belastbarer Daten geschaffen werden. Für die Immobilienwirtschaft gilt es, dazu über den Einsatz von Methoden hinwegzukommen, die Inputs und Outputs separat voneinander durch Abfragen erheben, indem neurowissenschaftliche Methoden einbezogen werden. Dies ermöglicht es, gesellschaftliche Prozesse in Innenstädten zu verstehen und flexible und resiliente Gestaltungen abzuleiten, die nicht schlichtweg auf Traditionen oder Bauchgefühlen basieren, sondern die Stadt zum Zentrum für Menschen macht.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Literaturstudie

Bisweilen fehlt es in der Stadtforschung an einem Überblick über mögliche Methoden zur Messung menschlicher Wahrnehmungen und menschlichen Verhaltens im Kontext von Innenstädten. Diese Literaturstudie dient daher der Erfüllung von drei zentralen Zielen. Nachdem in den vorangegangenen Studien (Pfnür/Rau, 2023; Pfnür/Rau, 2024a; Pfnür/Rau, 2024b) ein besseres Verständnis des Problems von (Innen-)Städten (Problemerkenntnis) gewonnen wurde, zielt die Studie darauf ab, die Prozesse der menschlichen Wahrnehmung und Verhaltensweisen in den Fokus zu rücken. Um diese Abläufe erklären und die Blackbox entschlüsseln zu können, wird im ersten Schritt ein Grundverständnis über diese kognitiven Prozesse benötigt. Basierend darauf können die unterschiedlichen Messverfahren zusammengetragen werden, welche vielfältigen Fachdisziplinen entstammen. In dieser Studie gilt es, Transparenz über die Methoden zur Erfassung menschlicher Daten im Zusammenhang mit Wahrnehmung und Verhalten zu genieren. Die erste Forschungsfrage lautet deshalb:

- *Wie können Wahrnehmung und Verhalten von Menschen vermessen werden?*

Ausgehend von den aus der Literatur identifizierten Messmethoden ist es im nächsten Schritt das Ziel, diese detailliert zu betrachten. Hierzu werden insbesondere Informationen in den folgenden Kategorien gesammelt und präsentiert:

- **Anwendung im Stadtkontext:** Gibt es bereits Anwendungsbeispiele der Methode im urbanen Kontext?
- **Tools:** Welche technischen Systeme werden benötigt?
- **Daten und Datenschutz:** Welche Art von Daten wird erhoben und ausgewertet?
- **Ort der Durchführung & Zeitaufwand:** Wie lange dauert die Erhebung und wo findet sie statt?
- **Durchführung:** Wie läuft die Messung ab?
- **Mögliche Fehlerquellen:** Gibt es technische Herausforderungen oder Bias?
- **Kosten-Nutzen/Wirtschaftlichkeit/Komplexität:** Welche Kosten werden verursacht und welcher Nutzen damit erzielt?
- **Übertragbarkeit & Kombinationsmöglichkeiten:** Ist eine (kombinierte) Anwendung im urbanen/Immobilien Kontext sinnvoll/ratsam?

Insbesondere gilt es, dadurch die Methoden, deren bisherige Einsatzgebiete, notwendige Bedingungen und ihre Vor- und Nachteile zu identifizieren. Die zweite Forschungsfrage lautet somit:

- *Was, womit, wie und warum werden menschliche Wahrnehmung und Verhaltensweisen gemessen?*

Anhand der erstellten Gesamtübersicht zielt die Studie darauf ab, die vielversprechendsten Methoden auf ihre Übertragbarkeit für den Innenstadtkontext hin zu überprüfen. Durch die Eruierung ihrer Potenziale und Grenzen sollen fiktive Szenarien entwickelt werden, die einen möglichen Einsatz der Methoden im Rahmen der Entwicklung lebenswerter, zukunftsorientierter und menschenzentrierter Innenstädte aufzeigen. Die dritte Forschungsfrage lautet demnach:

- *Welche Methoden könnten im Kontext der Entwicklung und Planung zukunftsorientierter Innenstädte vorteilhaft Anwendung finden?*

Zur Zielerreichung erfolgt der Ablauf der Studie in vier Schritten. Die Literaturrecherche zu Beginn dient der Identifikation relevanter Studien aus wissenschaftlicher und praxisorientierter Literatur, welche mithilfe eines iterativen Prozesses kontinuierlich weiter vertieft wird. Im zweiten Schritt erfolgt die Analyse des State of the Art, um eine semi-

systematische Übersicht der Methoden zu erzeugen. Danach wird im dritten Schritt eine Auswertung der Messmethoden vorgenommen, bevor alle Ergebnisse abschließend im Projektbericht zusammengeführt werden.

2 Kontext und Begriffsbestimmung

Um ein Verständnis für den Kontext der Innenstädte in Deutschland und die Mechanismen menschlicher Wahrnehmung und Verhaltensweisen zu entwickeln, wird nachfolgend ein kurzer Überblick über den Transformationsbedarf der Städte geboten. Ausgehend davon folgt ein Abriss des Status quo jener wissenschaftlichen Strömung, die das Zusammenspiel von menschlichem Gehirn und städtischer Umgebung zum Kern ihrer Forschungsarbeit gemacht hat, die Neurourbanistik. Zur Vermessung menschlicher Wahrnehmung und Verhaltensweisen ist darüber hinaus auch das Zusammenspiel zwischen Mensch und Umgebung relevant. Aus diesem Grund wird anschließend ein Einblick in die Embodiment-These der Kognitionswissenschaft gegeben, welche sich mit dem Zusammenspiel menschlicher Wahrnehmung und Verhaltensweisen beschäftigt. Abschließend ist anhand des kognitiven Systems eine Struktur abgeleitet, anhand derer die Messmethoden im Ergebniskapitel geordnet dargestellt werden.

2.1 Zusammenspiel von Menschen und Immobilien

Diederichs (1994) versteht unter Projektentwicklung die Kombination der Faktoren Standort, Projektidee und Kapital, mit dem Ziel, Immobilienobjekte zu schaffen, die sowohl einzelwirtschaftlich wettbewerbsfähig als auch gesamtwirtschaftlich sozial- und umweltverträglich sind und dauerhaft rentabel genutzt werden können. Im unüblichen Fall der Projektentwicklung zur Eigennutzung ist sowohl der Nutzer als auch die Nutzung nach Art und Umfang weitgehend bekannt (Pfnür 2011). Im Kontrast dazu werden in den meisten Fällen Immobilien für einen mehr oder weniger anonymen Markt entwickelt, dessen Anforderungen meist unbekannt oder nicht genau bekannt sind. In beiden Fällen rückt der (End-)Nutzer, also der Innenstadtbesucher und dessen Präferenzen und Bedarfe, für den Projektentwickler mittelbar oder unmittelbar in den Fokus. Dieser ist in der Pflicht, die Immobilie maßgeschneidert für die (End-)Nutzer zu planen, über deren Präferenzen und kognitiven Prozesse, die zu diesen Präferenzen und Entscheidungen führen, er aber nur extrem eingeschränkte Einblicke hat. In dem Projektentwicklungsprozess ist der Mensch bis jetzt also eine Blackbox, für dessen Durchleuchtung diese Studie einen Methodenbaukasten liefert. Als messbare Daten gehen die Informationen über die Immobilien auf der einen Seite herein, auf der anderen Seite der Blackbox kommen die gut beobachtbaren Verhaltensweisen des Menschen heraus. Dieser Output wurde bereits in vorhergehenden Studien des Fachgebiets Immobilienwirtschaft und Baubetriebswirtschaftslehre der TU Darmstadt erhoben. Die Ergebnisse zeigen klar, dass die Menschen unzufrieden mit der aktuellen Gestaltung der Innenstadt sind. Die Stadt bietet also nicht das, was sich die Menschen wünschen.

Insbesondere im Kontext der Innenstädte gelangt dieser Prozess an eine kritische Schnittstelle: Denn Innenstädte sind nicht vordergründig ein Ort für Immobilieninvestitionen, sondern vielmehr auch ein Lebensraum und Zentrum der Zivilisation und des Fortschrittes, der auf die Bedürfnisse der Menschen abgestimmt werden muss. Die besondere Herausforderung besteht darin, dass klassische Projektentwicklungsansätze oft den dynamischen Anforderungen moderner Innenstädte nicht gerecht werden. Um die Innenstadt wieder zu einem besuchenswerten Ort zu machen, müssen die „Blackbox Mensch" geöffnet, die kognitiven Prozesse verstanden und die Innenstädte entsprechend geplant werden.

Bislang werden die Innenstadtplanung und die Auslegung einzelner Immobilien auf Basis der Erfahrungen vergangener Projekte durchgeführt. Ein Problem dabei ist die langsame Feedbackschleife, die ein direktes Lernen schwierig macht. Dadurch wird es schwierig, im Nachhinein konkrete Schlüsse darüber zu ziehen, welche Aspekte eines Konzepts erfolgreich waren, und welche verbessert werden müssen. Konkret bedeutet das, dass es kaum möglich ist, die ausschlaggebenden Aspekte – sei es die Wegführung, die Materialität oder andere Faktoren – eindeutig zu identifizieren. Dadurch werden viele Planungen durch das Bauchgefühl der Projektentwickler beeinflusst („Das haben wir immer so gemacht"). Ein wissenschaftlicherer Ansatz ist die Befragung der Interessengruppen und eine Beobachtung der Reaktionen der Nutzenden, z. B. der Bewegungs- und Nutzungsdaten.

Nach Selbsteinschätzung der Menschen steht für sie zukünftig ein erlebnisreicher und spannender Innenstadtbesuch im Fokus. Ein möglicher Lösungsansatz könnte durch eine stärkere Multifunktionalität und Mixed-Use-Immobilien geboten sein, um die veränderten Bedarfe der BürgerInnen abzudecken und dazu beizutragen, dass sich die Menschen in der Innenstadt wohlfühlen. Auch gemessen an den Bewegungsdaten der BesucherInnen beeinflusst die Gestaltung von Räumen die Art, wie und wer die Innenstadt nutzt. So können sich architektonische Gestaltungsentscheidungen als gefährliche Altlasten für Innenstädte erweisen. Die Folge der dehumanisierten Gebäude kann eine ausschließliche Frequentierung der Orte durch bestimmte Gesellschaftsgruppen sein, wodurch die soziale Durchmischung beeinträchtigt ist. Darüber hinaus kann eine Ansiedlung an qualitativ geringwertigen Angeboten weitere Angebote dieser Art anlocken und so zu einer Verstärkung eines solchen Trends führen. Eine einfache Betrachtung der Selbsteinschätzung birgt aber Risiken, da die Aussagen nicht zwangsläufig mit dem zukünftigen Verhalten übereinstimmen. Gründe dafür sind Bias, wie z. B. der Konformitätsbias (Kondo et al., 2010). Die Zukunftsfähigkeit der Innenstädte hängt jedoch maßgeblich von dem tatsächlichen Verhalten der BürgerInnen ab. Dieses wiederum steht in engem Zusammenhang mit ihrer Wahrnehmung. Die Vermenschlichung der Immobilien kann zu einer größeren Bedürfnisbefriedigung der

Menschen führen. Dieser naturwissenschaftliche Weg der Immobilienwirtschaft – das „Humanizing“ der Immobilien – soll den Nutzen der Innenstädte fördern.

Ziel einer Verbesserung ist es, die Bedürfnisse der Nutzer zu erfüllen – sowohl materielle, wie die Versorgung oder die Bereitstellung von Wohn- und Arbeitsraum, als auch immaterielle, wie das Zusammenkommen, den Austausch und das allgemeine Wohlbefinden. Besonders die Messung des Befriedigungsgrades immaterieller Bedürfnisse erweist sich als schwierig. Wann ist ein Bedürfnis erfüllt? Wie kann es besser erfüllt werden und was beeinflusst es? Die Einflüsse auf den Menschen sind vielfältig. So können z. B. die Sichtbarkeit und die Wegeführung zu einem Objekt die Auffindbarkeit bestimmen, während die Fassade dem Nutzer hilft, sich von der Qualität zu überzeugen. Dabei sollte das Interesse des Nutzers aus verschiedenen Entfernungen (Door Distance, Street Distance, City Distance) geweckt werden (Heatherwick, 2023). Die Umgebung wirkt dabei als bestimmender Hintergrundfaktor, der in das Gesamtkonzept einbezogen werden sollte. Nach dem Betreten des Gebäudes wird die Zufriedenheit des Nutzers durch den Nutzungsmix und die Anzahl der anwesenden Personen beeinflusst. Dabei sind die Erfahrungen für jeden Menschen unterschiedlich, da die wirkenden Einflussfaktoren aufgrund der individuellen Lebenserfahrung bewertet werden. Je nach Zielgruppe sollte dies bei der Planung berücksichtigt werden. Dies sind nur einige Beispiele, die das breite Spektrum der Einflussfaktoren aufzeigen sollen und keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Die klassischen Nutzungsarten Wohnen, Büro und Einzelhandel müssen dabei nach unterschiedlichen Kriterien bewertet werden. In Kapitel 5.3 wird beispielhaft ein Untersuchungsprozess anhand einer Multifunktionsfläche dargestellt.

Neben den klassischen Nutzungsarten Wohnen und Büro wird im Folgenden als Beispiel die Nutzungsart des Einzelhandels genauer betrachtet. Die Einflüsse auf den Nutzer sollen anhand der Abbildung 1 dargestellt werden.

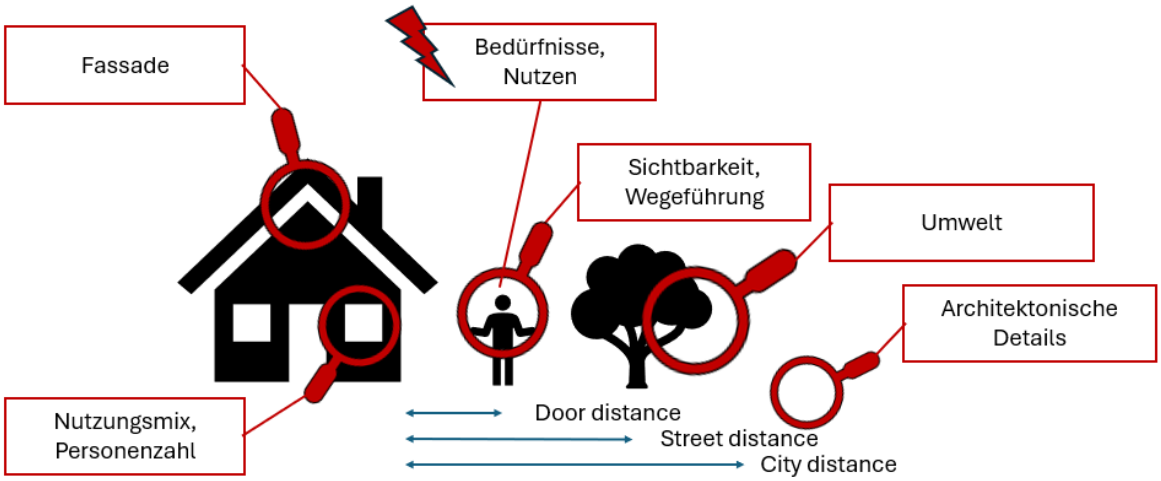


Abbildung 1: Exemplarische Darstellung externer Einflüsse auf den Immobiliennutzer (Eigene Darstellung, 2024)

Nur wenn es gelingt, Städte menschengerecht umzugestalten, können lebenswerte und wirtschaftlich tragfähige Entwicklungen entstehen. Für die Akteure der Stadtplanung, aber auch für die Immobilieneigentümer ist es daher wichtig, ein tiefes Verständnis für das menschliche Erleben zu erlangen. Nur mit dem Verständnis, wie Innenstädte gestaltet werden müssen, damit Menschen sie mit Begeisterung nutzen, können Eigentümer ihre Gebäude werterhaltend durch den Transformationsprozess navigieren.

2.2 Transformationsbedarf deutscher Innenstädte und Werkzeuge der Entwicklung und Gestaltung

Den Ausgangspunkt dieser Studie bilden die Ergebnisse der vorangegangenen Projekte zur Transformation der Innenstädte, welche im Rahmen der Forschungskooperation mit Midstad entstanden sind. Dabei wurde zuerst der Status quo der Transformation deutscher Innenstädte aus Sicht der Eigentümer identifiziert (Pfnür/Rau, 2023) und aufbauend darauf in zwei Teilstudien mit empirischen Daten mögliche Nutzungskonzepte und Bürgerpräferenzen zur Transformation von Innenstadtquartieren und -immobilien analysiert (Pfnür/Rau 2024a, 2024b).

Die Ergebnisse zeigen im Kern, dass sich die Innenstädte inmitten eines tiefgreifenden Strukturwandels befinden, welcher die dortigen immobilienwirtschaftlichen Wertschöpfungskonzepte, insbesondere die monofunktionale Ausrichtung auf den Einzelhandel, infrage stellt. Verursacht wird der Strukturwandel insbesondere durch Megatrends, wozu der gesellschaftliche, technologische und ökologische Wandel zählen. Wesentliche Symptome dieses Transformationsprozesses in Wirtschaft und Gesellschaft sind der Wandel des Konsumverhaltens und der zunehmende Onlinehandel, welche wesentlichen Einfluss auf die Innenstadt haben. Unmittelbar sichtbar werden die Folgen in Form von

steigenden Leerständen, bei sinkenden Mieten in den Einzelhandelsflächen, welche die Gefahr von Trading-down-Effekten bergen. Dadurch ist der Handlungsdruck für Eigentümer groß, ihre innerstädtischen Immobilienbestände der neuen Realität anzupassen und einem drohenden Wertverfall zu entgehen.

Gemäß Camargo et al. (2021) können Neurowissenschaften als Werkzeug dienen, das es denjenigen, die sich mit der Gestaltung und Entwicklung von Städten auseinandersetzen, ermöglicht, die Auswirkungen ihrer Arbeit auf die menschliche Biologie besser zu verstehen. Abbildung 2 zeigt eine Übersicht der Innovationen, welche durch die Neurowissenschaften im Bereich der gebauten Umwelt möglich werden, und hebt die für diese Studie besonders relevanten Teilaspekte hervor. In der Darstellung wird deutlich, dass das Spektrum, in welchem Neurowissenschaften Möglichkeiten schaffen können, groß ist. Während unterschiedliche makroökonomische Themenfelder und Möglichkeiten im Bereich der gebauten Umwelt, der Wirtschaft und des Designs aufgezeigt werden, bleibt die Immobilienwirtschaft unbeachtet. Doch auch gerade für diesen Wirtschaftszweig, der sich mit dem gesamten Lebenszyklus von Immobilien, von Entwicklung, Produktion, Bewirtschaftung bis hin zur Vermarktung beschäftig, können die Neurowissenschaften und ihre objektiven Messmethoden eingesetzt werden. Es ist aus allen drei Perspektiven auf Immobilien, Nutzer-, Eigentümer- und Produzenten von großem Interesse, die Blackbox zu entschlüsseln, die zwischen der Wirkung von Gebäuden auf Menschen und ihrer Reaktion darauf bislang in weiten Teilen unzureichend geklärt bleibt.

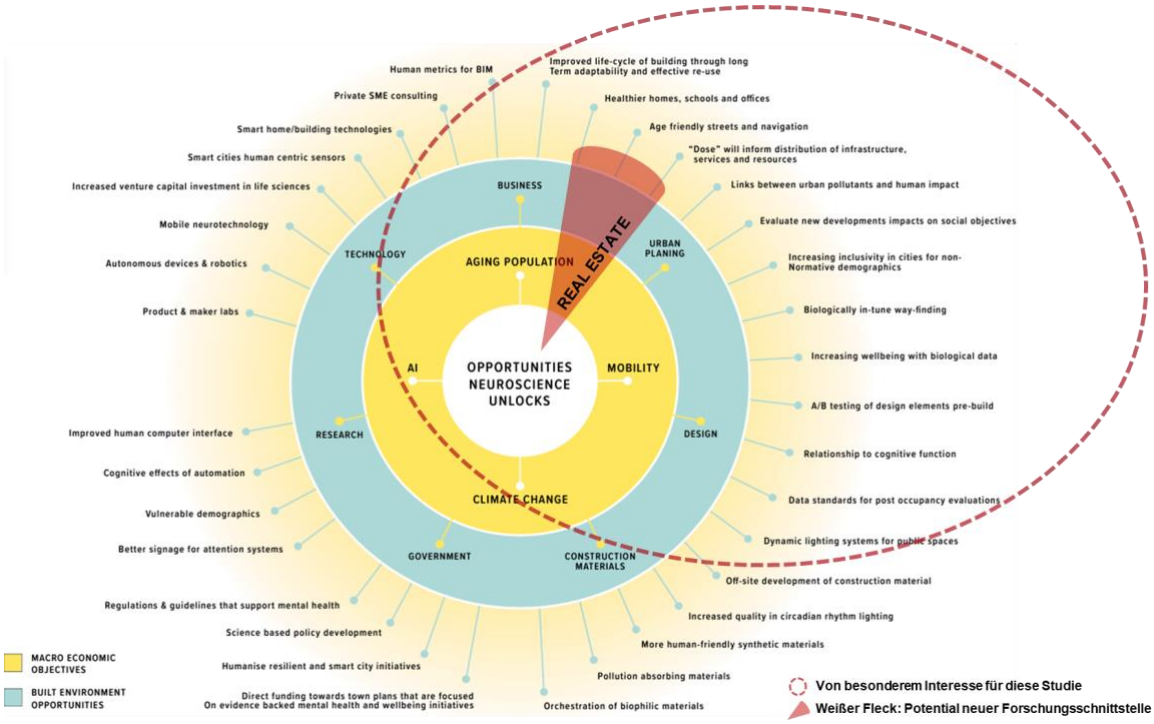


Abbildung 2: Spektrum der Neurowissenschaften (in Anlehnung an Camargo et al., 2021, S. 12-13)

2.3 Neurowissenschaften und der Status quo der Neurourbanistik

Die Neurowissenschaften sind ein multidisziplinärer naturwissenschaftlicher Forschungsbereich der Medizin, welcher sich mit dem Aufbau und der Funktionsweise des Nervensystems und des Gehirns beschäftigt und dabei auch die Interaktion mit anderen Teilen des Körpers einbezieht (Voigt, 2020). Weiter gefasste Definitionen des Begriffs schließen auch das Studium des menschlichen Denkens, der Gefühle und des Verhaltens mit ein, da diese durch das Gehirn und das Nervensystem entstehen (Camargo et al., 2021). Die Neurowissenschaften helfen somit, zu verstehen, wie Menschen die gebaute Umwelt erleben, die sie umgibt (Camargo et al., 2021). Damit ermöglichen es neuste Entwicklungen in diesem Bereich, Umgebungen entstehen zu lassen, die verbesserte Erfahrungen im Sinne einer stärkeren Menschenzentriertheit erzeugen.

An der Schnittstelle zwischen Stadt- und Gesundheitsforschung hat sich außerdem in den vergangenen Jahren ein neues Forschungsfeld etabliert: die Neurourbanistik. Giray Küçük und Yüceer (2022) beschreiben vereinfacht, dass Städte aus Gebäuden, den Freiflächen zwischen den Gebäuden (z. B. Straßen und Grünflächen) und den Menschen bestehen. Während sich die Neuroarchitektur insbesondere mit dem Einfluss von einzelnen Gebäuden mit ihren Strukturen und ihrem Design auf die Menschen beschäftigt, so untersucht die Neurourbanistik den Effekt der größeren Einheit einer Stadt auf das Gehirn der Individuen. ForscherInnen beschäftigen sich mit der Fragestellung, wie Städte gestaltet sein sollten, um die psychische und körperliche Gesundheit von Menschen zu fördern (Berg, 2020). Das primäre Ziel ist es, den Einfluss von Städten auf Emotionen, Verhalten und psychische Gesundheit der Bewohner zu verstehen. Dazu arbeitet eine Vielzahl an Forschenden, beispielsweise PsychologInnen, MedizinerInnen, StadtforscherInnen und ArchitektInnen, mithilfe von interdisziplinären Ansätzen zusammen. Bisweilen herrscht weitestgehend Einigkeit darüber, dass es die ideale Stadt nicht gibt, sondern sie den BürgerInnen dann guttut, wenn diese dazu animiert werden, an der Stadt teilzuhaben (Adli, 2024).

Die Ergebnisse dieses neuen Forschungsfeldes sind nicht nur für die breite Gesellschaft hochgradig relevant, sondern insbesondere von großem Interesse für Stadtverwaltungen, da sie diesen dazu verhelfen, datengesteuerte Ansätze in der Verwaltung zu realisieren und eine evidenzbasierte Politik des städtischen Wohlbefindens zu verfolgen (Pykett et al., 2020). Die Untersuchung der neuronalen Mechanismen, welche den kognitiven und emotionalen Prozessen zugrunde liegen, die durch den Kontakt mit verschiedenen städtischen Gebäuden und Naturräumen ausgelöst werden, bildet den Ausgangspunkt dafür (Ancora et al., 2022). Geforscht wird in der Neurourbanistik, wie der Begriff bereits erahnen lässt, mithilfe von neurowissenschaftlichen Methoden (Pykett et al., 2020). Sie ermöglichen es, Zusammenhänge

zwischen dem menschlichen Gehirn und der gebauten Umwelt, beispielsweise städtische Dichte, Stadtlandschaften oder architektonische Formen, sichtbar zu machen.

In der Neurourbanistik- und Neuroarchitekturforschung werden bislang maßgeblich bildgebende Verfahren und Stimulationsmethoden des Gehirns eingesetzt. Dazu zählen beispielsweise das Elektroenzephalogramm (EEG), die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRI), physiologische Messungen, wie Hautreaktions- oder Herzfrequenzvariabilitätstests, und Eyetracking (Ritchie, 2020). In ihrem Literaturüberblick zu Städten und Neurowissenschaften zeigen Ancora et al. (2022), dass sich die veröffentlichten Untersuchungen der neuronalen Mechanismen primär auf kurzfristige neuronale Reaktionen fokussieren und größtenteils im Labor durchgeführt werden. Langfristige Auswirkungen hingegen und Experimente in realen Umgebungen oder hybride Designs werden bislang selten beschrieben. Einige Studien untersuchen die verkörperten Erfahrungen der Menschen, sog. „embodied experiences“, worunter die achtsame und körperliche Interaktion mit der Umgebung verstanden wird (Giray Küçük/Yüceer, 2022).

Inhaltlich sind derzeitige Neurourbanistikstudien insbesondere auf Navigation und Wegeführung, Interaktion zwischen Menschen und Natur, verkörperte Erfahrungen sowie Umweltstressoren und psychische Gesundheit ausgerichtet (Giray Küçük/Yüceer, 2022). Der Literaturüberblick von Ancora et al. (2022) verdeutlicht, dass städtische Bebauung, im Kontrast zu natürlichen Räumen, eine Aktivierung in Gehirnregionen auslöst, die stark mit den Wahrnehmungs-, Aufmerksamkeits- und kognitiven Anforderungen zusammenhängt, welche insbesondere Stress und negative Affekte aufzeigen. Positive Affekte und individuelles Wohlbefinden der Menschen hingegen werden entscheidend durch die Vielfalt der Umwelt bestimmt, welche sich durch biologisch vielfältige Stadtgebiete, beispielsweise mit hochwertigen Grün- und Wasserflächen, auszeichnet.

Dem Ziel folgend eine breite Übersicht von Methoden zur Messung menschlicher Wahrnehmung und Verhaltensweisen zu erstellen, schließt diese Studie bewusst Forschungs- und Praxisartikel ein, die über das Feld der Neurourbanistik hinausgehen, um alle relevanten Aspekte der Neurowissenschaften einzubeziehen und nicht den Fokus auf die Gesundheit der Menschen in Städten zu beschränken. In ihrem „Playbook for Placemakers“ haben Camargo et al. (2021) eine Abbildung des Umfangs der Neurowissenschaften erstellt, welche in Abbildung 3 dargestellt ist.

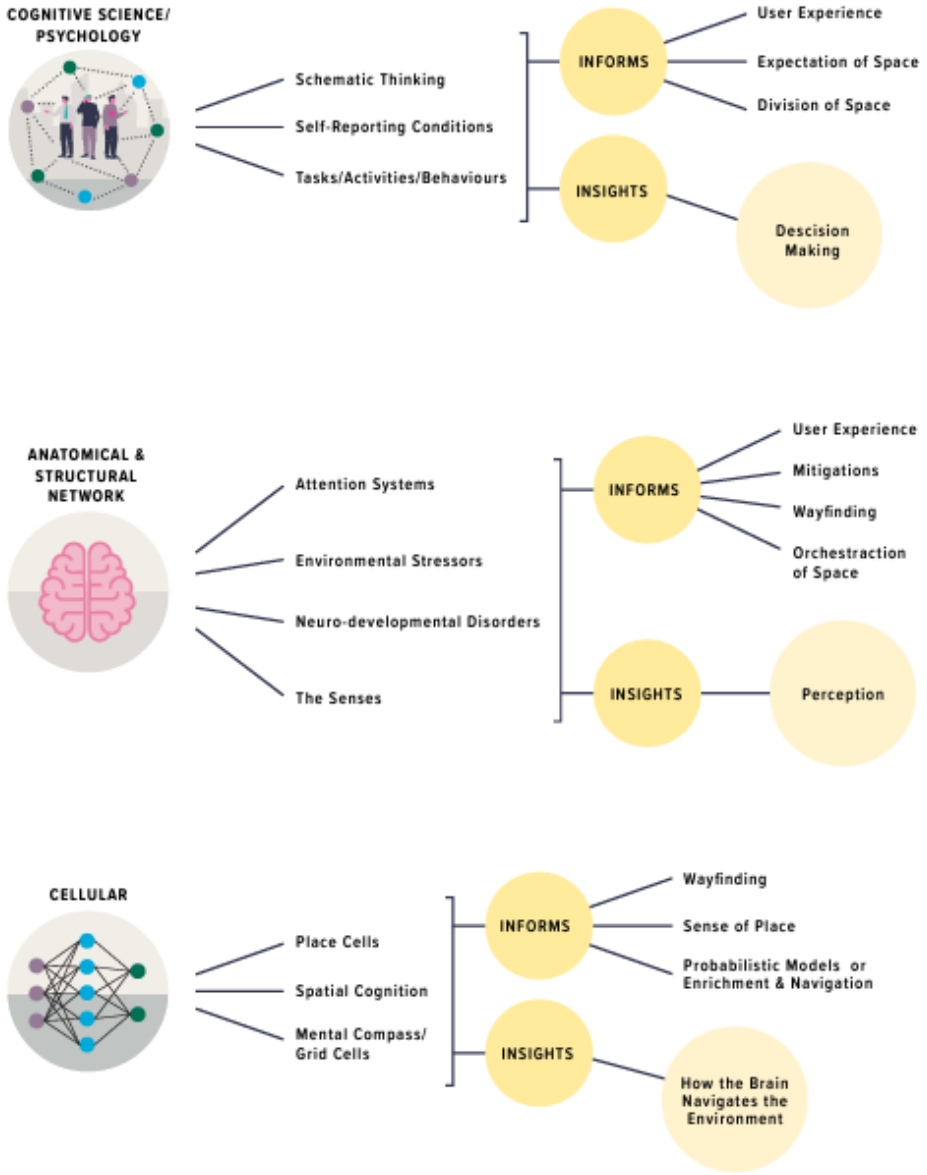


Abbildung 3: The scale of neuroscience (Camargo et al., 2021)

Die Abbildung ist in diese Studie aufgenommen, da sie sehr anschaulich verbildlicht, dass die Untersuchungsmethoden der Neurowissenschaften auf unterschiedlichen Ebenen ansetzen. Je nach Fragestellung eröffnen sich unterschiedliche Möglichkeiten der Messung. Der Mensch mit seinem Gehirn und Nervensystem und die Schnittstelle zwischen seinem Körper und der Umgebung steht dabei im Zentrum.

Mit dem Versuch, neuronale Grundlagen für menschliches Verhalten und Kognition zu verstehen, werden im Forschungsbereich der kognitiven Neurowissenschaften experimentelle psychologische und neurowissenschaftliche Methoden kombiniert (Camargo et al., 2021). Die kognitiven Neurowissenschaften untersuchen somit, wie das menschliche Verhalten durch die neuronalen Aktivitäten des Gehirns gesteuert wird (Hu/Roberts, 2020), und stellt damit eine Möglichkeit dar, menschliche Reaktionen auf die gebaute Umwelt zu untersuchen. Um die

Hintergründe der Kognitionswissenschaft besser zu verstehen, wird im nächsten Abschnitt auf eine These der Kognitionswissenschaft genauer eingegangen, welche sowohl menschliche Wahrnehmung als auch Verhaltensweisen berücksichtigt.

2.4 Embodiment-These der Kognitionswissenschaft untersuchen das Zusammenspiel menschlicher Wahrnehmung und Verhaltensweisen

Die Kognitionswissenschaft ist eine interdisziplinäre Wissenschaft, die sich mit der Verarbeitung von Informationen bei Wahrnehmungs-, Denk- und Entscheidungsprozessen befasst (Gardner, 1989; Stephan/Walter, 2013). Die Interdisziplinarität der Wissenschaft ergibt sich durch die vielfältigen Einflüsse, beispielsweise aus der Psychologie (Wissenschaft des menschlichen Erlebens und Verhaltens), den Neurowissenschaften, der Informatik, aber auch besonders der Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik (Sturm/Gundlach, 2013). Innerhalb der Kognitionswissenschaft gibt es unterschiedliche Thesen darüber, wie kognitive Aktivitäten entstehen. Die Betrachtung des Wechselspiels von Wahrnehmung und motorischen Prozessen wird unter dem Begriff „embodiment“ (Verkörperlichung) verortet. Verkörperte Erfahrungen sind für Menschen wichtig, um eine Sinnhaftigkeit zu manifestieren (Evans, 1992). Im Kontext der Erfassung relevanter Messmethoden menschlicher Wahrnehmung und Verhaltensweisen ist nachfolgend diese sogenannte „Embodiment“ These grundlegend. Gemäß dieser These entstehen kognitive Aktivitäten durch Wechselwirkungen zwischen dem Körper, welcher selbst als wertvolle kognitive Ressource verstanden wird, und der menschlichen Psyche (Walter et al., 2023). Demnach bildet der Mensch, mit seinem Geist und seinem Körper, zusammen mit anderen Menschen und der Umwelt/Umgebung, die sie umgibt, ein kognitives System. Abbildung 4 zeigt eine vereinfachte Darstellung der für diese Studie relevanten Zusammenhänge der Kognitionswissenschaft, begonnen bei den Einfluss nehmenden Disziplinen über die These des Embodiment bis hin zur Skizze des kognitiven Systems.

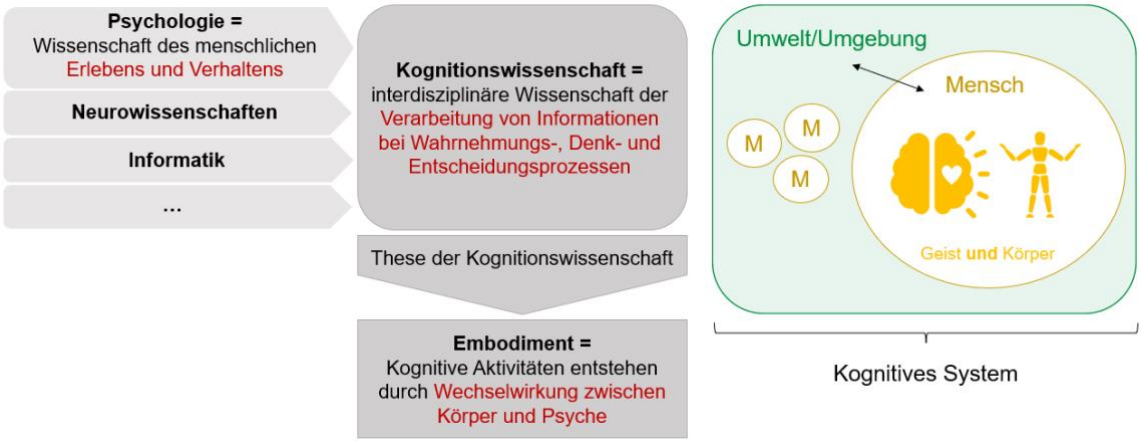


Abbildung 4: Vom Aufkommen der Kognitionswissenschaft bis zur Embodiment-These (eigene Darstellung, 2024)

Im Detail geht die Theorie des Embodiment davon aus, dass psychische Symptome und körperliche Verhaltensweisen aufeinander aufbauen. Kognition ist demnach nicht allein eine Aktivität der Psyche, sondern beinhaltet sowohl den Geist als auch den Körper und die natürliche und kulturelle Umgebung sowie andere Menschen. Über die Sinne können Reize aus der Umwelt wahrgenommen werden. Durch das Zusammenspiel und die Wechselwirkungen zwischen Psyche und Körper des Menschen entsteht eine Reaktion – häufig in Interaktion mit der Umgebung. Abbildung 5 verdeutlicht diese Zusammenhänge noch einmal in einer Darstellung auf die für diese Studie wesentliche Bestandteile.

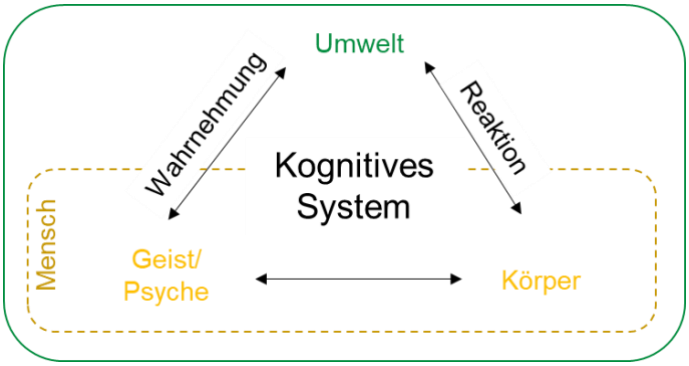


Abbildung 5: Kognitives System (eigene Darstellung, 2024)

Zur ganzheitlichen Sammlung der Methoden zur Erfassung menschlicher Wahrnehmung und Verhaltensweisen kann an unterschiedlichen Stellen des kognitiven Systems angesetzt werden. Im nächsten Kapitel wird auf diesen Strukturierungsansatz der Methoden genauer eingegangen.

2.5 Ansatz zur Strukturierung der Methoden in dieser Studie basierend auf dem ko-gnitiven System

Die Vorstellung und vereinfachte Darstellung des Entstehens von kognitiven Aktivitäten durch die Wechselwirkungen zwischen Körper und Psyche dient als Grundlage zur Erfassung jener Methoden zur Messung menschlicher Wahrnehmung und Verhaltensweisen. Zerlegt man das kognitive System, wie es in Kapitel 2.4 erläutert wird, so ergeben sich fünf Einzelteile: die Umwelt/Umgebung, die Reaktion, der Körper und die Psyche des Menschen und dessen Wahrnehmung. Jedes dieser Einzelteile ist mithilfe von unterschiedlichen Methoden messbar (vgl. Abbildung 6). Während sich die Stadtforschung bislang maßgeblich auf Befragungen oder Daten aus Mobiltelefonen oder Laserscannern bezieht, steckt gerade in der Übertragung von neuronalen oder biosensorischen Messungen ein großes Potenzial. Umfragen, Handy- und Bewegungsdaten sind zwar eine geeignete Möglichkeit, die Reaktion der Menschen zu erfassen, doch geben sie wenig bis keine Auskunft über die zugrunde liegenden Ursachen der Aussagen, Entscheidungen und des Verhaltens. Mit dem Ziel, eine vollständige Übersicht des

Status quo an Messmethoden menschlicher Wahrnehmung und Verhaltensweisen zu erstellen, mithilfe derer die Innenstadtforschung zukünftig datengetriebene Ergebnisse und Handlungsempfehlungen ableiten kann, werden jedoch auch bereits eingesetzte Methoden zur Erfassung der Reaktion in den Ergebnissen dieser Studie integriert. Der Fokus liegt aber auf dem Menschen und seiner Wahrnehmung, um frühe, größtenteils unbewusste Verarbeitungsprozesse im Gehirn und Körper zu messen, welche weniger anfällig für kognitive oder bewusste Verzerrungen sind (Maison, 2001). Außerdem beginnt Kapitel 4 mit einem kurzen Überblick zur Stimulation verschiedener Umwelten und Umgebungen, z. B. Virtual Reality.

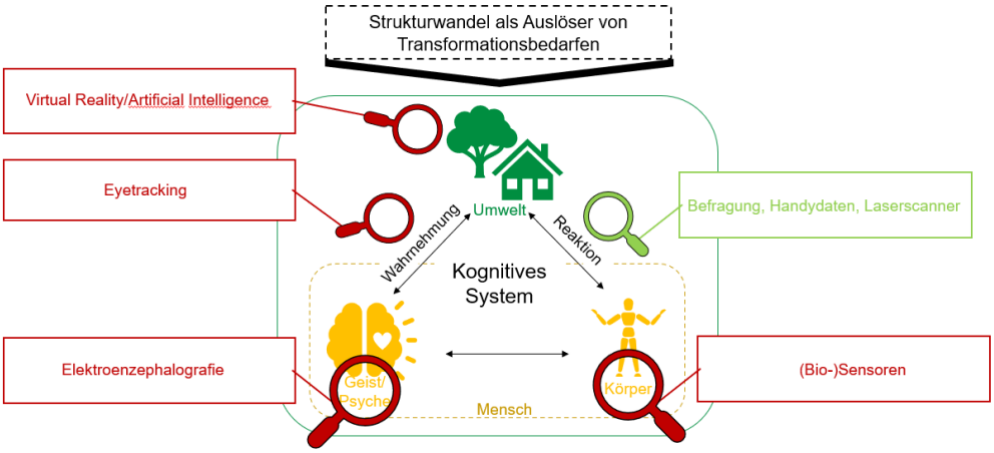


Abbildung 6: Anknüpfungspunkte im kognitiven System und exemplarische Messmethoden (eigene Darstellung, 2024)

3 Methodisches Vorgehen

Zur besseren Einordnung der Studie werden vor der Darstellung der Ergebnisse in diesem Abschnitt das Studienkonzept und die Vorgehensweise vorgestellt. Dabei wird insbesondere auf die semisystematische Literaturübersicht nach Snyder (2019) eingegangen, um das Auswertungskonzept und die Analysemethoden darzustellen.

3.1 Studienkonzeption und wissenschaftliche Vorgehensweise

Die Studie ist eine Kooperation zwischen dem Forschungscenter Betriebliche Immobilienwirtschaft/Fachgebiet Immobilienwirtschaft und Baubetriebswirtschaftslehre der Technischen Universität Darmstadt und Midstad.

Die Studie ist qualitativer Natur. Es wird eine semistrukturierte Literaturrecherche in einschlägigen Onlinedatenbanken für wissenschaftliche Veröffentlichungen durchgeführt. Diese Studie reiht sich in eine übergeordnete Forschungsinitiative der TU Darmstadt und Midstad zur immobilienwirtschaftlichen Transformation der Innenstädte ein.

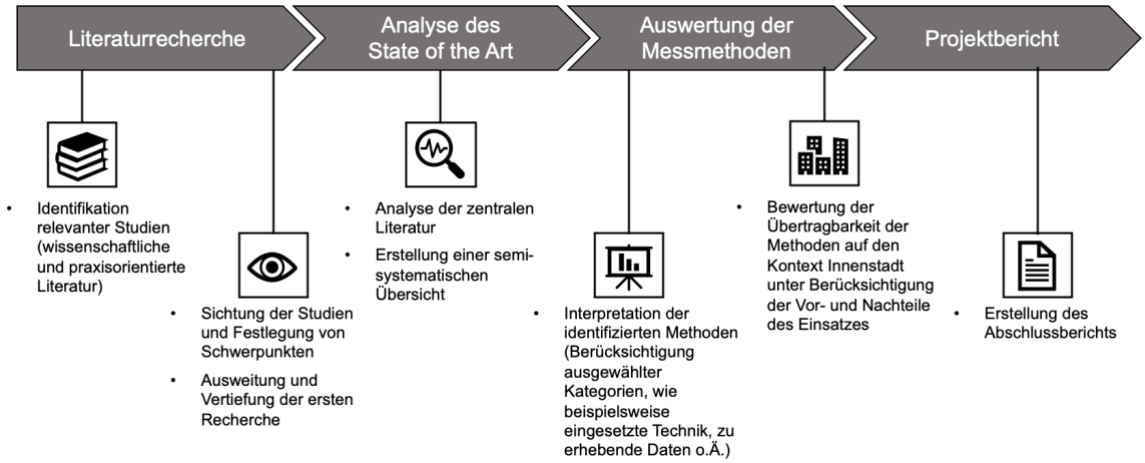


Abbildung 7: Sukzessives wissenschaftliches Vorgehen (eigene Darstellung, 2024)

Die vorliegende Studie wurde im Zeitraum von März 2024 bis September 2024 durchgeführt. Ausgehend von der Zielsetzung werden zunächst relevante Themengebiete über unstrukturierte Recherchen identifiziert. Dies dient der Identifikation für das State-of-the-Art-Papier relevanter Studien aus wissenschaftlicher und praxisorientierter Literatur. Anschließend werden die Studien gesichtet und Schwerpunkte identifiziert, welche als Ausgangspunkt für eine Ausweitung und Vertiefung in die Literaturstränge dienen. Im nächsten Schritt werden die zentralen Literaturstränge bestimmt und in einer semistrukturierten Literaturrecherche aufgearbeitet. Die identifizierten Methoden zur Messung menschlicher Wahrnehmung und Verhaltensweisen im Allgemeinen werden daraufhin anhand von festgelegten Kriterien analysiert. Die Auswahl der Kriterien erfolgt auf Basis der ersten Recherche und durch Reflexion mit den Projektbeteiligten ExpertInnen. Im

letzten Schritt werden die gewonnenen Erkenntnisse genutzt, um die Übertragbarkeit der Messmethoden im Kontext der Innenstadttransformation zu evaluieren.

Limitationen und Begrenzungen der Untersuchung

Es sei angemerkt, dass durch die gewählte Methode Quellen unberücksichtigt bleiben können. Hierdurch sind die Erkenntnisse und Rückschlüsse, die in der Arbeit getroffen werden, zwangsläufig nicht abschließend. Zudem ist das Vorgehen bei der semisystematischen Literaturrecherche weniger standardisiert und an die jeweilige Fragestellung angepasst. Dadurch ist die Vergleichbarkeit und Überprüfbarkeit der Ergebnisse eingeschränkt. (Snyder, 2019)

3.2 Hinweise zum Auswertungskonzept

Die Erfassung menschlicher Wahrnehmungen und Verhaltensweisen im Innenstadtkonzept ist ein verhältnismäßig neuer Ansatz. Um die zuvor definierten Ziele dieser Ausarbeitung zu erreichen, ist es notwendig, die oftmals in einem anderen Kontext stehenden Forschungsergebnisse aus einer Vielzahl von Forschungsdisziplinen zu analysieren. Diese Ausgangssituation erlaubt es nicht, einen systematischen Review-Prozess durchzuführen (Wong et al., 2013). Ziel ist es, Literatur weit über die Grenzen der Forschung zur gebauten Umwelt hinaus zu identifizieren, zu analysieren und so eine möglichst breite Wissensbasis zu generieren. Diese soll jedoch alle potenziell für die Forschung zu menschenzentrierter Stadtplanung relevanten Methoden beinhalten. Aus diesem Grund wurde eine semi-systematische Literaturrecherche zur zielführenden Methodik dieser Studie ausgewählt (vgl. Snyder, 2019). Sie ermöglicht, ein Verständnis über das komplexe Forschungsvorhaben zu erlangen. Die Art und Weise der Literaturrecherche zur Erstellung eines Überblicks des Wissenstandes orientiert sich dabei an dem in Kapitel 2.5 aufgezeigten Meta-Narrativ. Konkret werden im Rahmen dieser Arbeit Methoden zusammengetragen, mit denen sowohl die menschliche Wahrnehmung und Verhaltensweisen als auch die kognitiven Prozesse, die dazwischenliegen, gemessen werden können. Hierfür werden konzeptuelle und empirische Studien zu den in Kapitel 2.5 dargestellten Bausteinen des kognitiven Systems gesucht.

Zunächst werden elektronische Datenbanken wir google scholar und web of science durchsucht. Um einen Einstieg zu finden und einen Startpunkt für relevante Stichwörter zu erhalten, wird eine unreine Recherche durchgeführt. Die relevanten Stichwörter waren „Methode“, „Messung“, „Wahrnehmung“ und „Verhalten“.

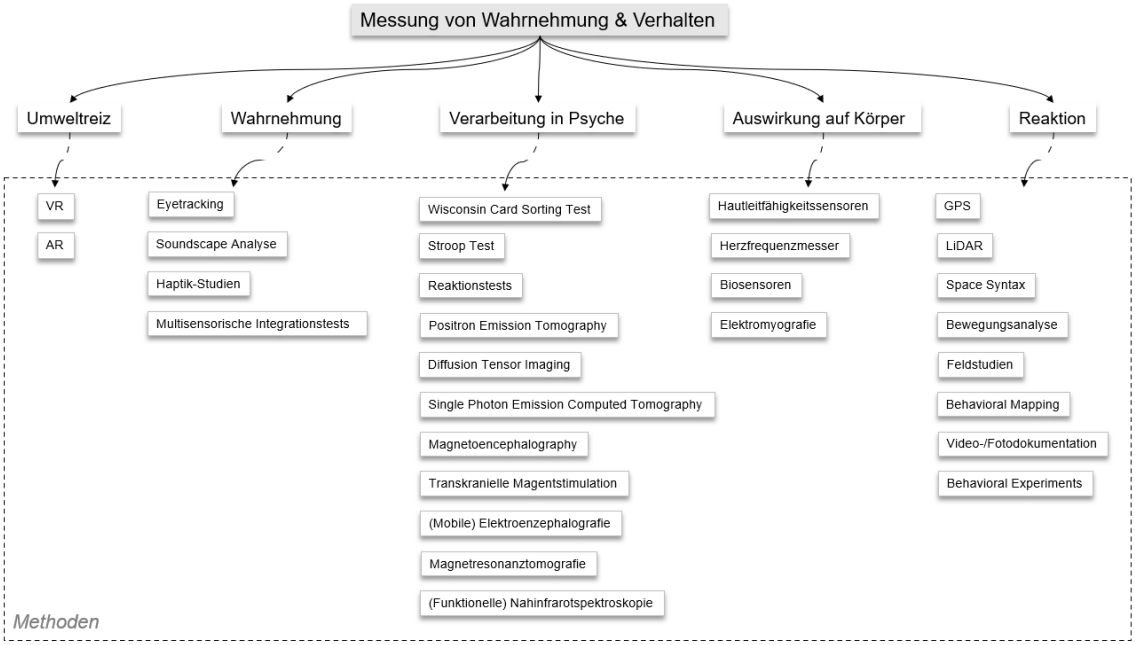


Abbildung 7: Identifizierte Messmethoden der ersten Suchiteration

Nach einem Abgleich der Methoden mit den Anknüpfungspunkten des kognitiven Systems wird das Ergebnis der ersten Suche vertieft fortgeführt. Ausgehend von den Erkenntnissen der ersten Suchiteration, wird die Suchstrategie angepasst und um Stichwörter ergänzt. Dazu wird der Inhalt der Studien kaskadenförmig gescreent, ausgehend vom Titel, dem Abstract und dem Inhalt der Studien. Diese Stichwörter des manuellen Literaturscreenings beinhalten folgenden Begriffe bzw. Kategorien:

- Anwendung im Stadtkontext
- Tools/technische Systeme
- Daten & Datenschutz
- Ort der Durchführung & Zeitaufwand
- Durchführung
- Kosten-Nutzen/Wirtschaftlichkeit/Komplexität
- Übertragbarkeit auf urbanen/Immobilienkontext & Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Methoden

Die Erkenntnisse der relevanten Studien werden in der Synthese zusammengeführt, inhaltlich analysiert und gemäß des Meta-Narrativs strukturiert und wiedergegeben. Mithilfe dieses Ansatzes wird das vorhandene Wissen kartiert und eine Agenda für weitere Forschung im Kontext der Transformation der Innenstadt erstellt.

4 State-of-the-Art Messmethoden

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Literaturstudie präsentiert, um einen Überblick über den State of the Art der Messmethoden zur Erfassung menschlicher Wahrnehmung und Verhaltensweisen zu bieten. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht aller in dieser Studie enthaltenen Methoden. In Anlehnung an den Strukturierungsansatz, basierend auf dem kognitiven System, dienen nachfolgend fünf Unterkapitel der Gruppierung.

Tabelle 1: Methodenübersicht

Anknüpfungspunkt im kognitiven System	**Kategorisierung**			**Methode**
Umwelt	Erweiterte Realität vor Ort			Augmented Reality
	Virtuelle Laborbedingungen			Virtual-Reality-Umgebungen
(Verhaltens-) Reaktion	Fokus auf Menschengruppen		Lauftracking	Positionsbestimmungssysteme und mobile Geräte
				LiDAR-Sensoren
			Räumliche Konfiguration	Space Syntax
	Fokus auf Individuen	Subjektive Erhebungsansätze	Erleben	Umfragen
				Interviews
			Gefühle/ Emotionen	Elektronisches Tagebuch
				Phänomenologische Tests
				Gefühlskarten
		Objektive Erhebungsansätze		Bewegungsanalyse
				Feldstudien
				Verhaltenskartografie
				Video-/Fotodokumentation
				Verhaltensexperimente
Wahrnehmung	Einzelne Sinne		Sehen (visuell)	Eyetracking
			Hören (auditiv)	Soundscape-Analyse
			Tasten (taktil)	Kreuzmodaler haptischer Objekterkennungstest und Zwei-Punkt-Diskriminationsmessung
	Diverse Sinne		Multimodale Wahrnehmung und Synästhesie	Multisensorische Integrationstests
Psyche	Gehirnaktivitäten/ Neurologie		Indirekte Messung	Wisconsin-Kartensortiertest
				Stroop-Test
			Direkte Messung	(Funktionelle) Magnetresonanztomografie
				Positronen-Emissions-Tomografie
				Diffusions-Tensor-Bildgebung

			Einzelfotonen-Emissions-Computertomografie
			Magnetoenzephalografie
			Transkranielle Magnet- und Gleichstromstimulation
			Mobile Elektroenzephalografie
			(Funktionelle) Nahinfrarotspektroskopie
Körper (Physiologie)	Haut		Hautleitfähigkeitssensoren
	Herz-Kreislauf-System		Herzfrequenzmesser
			Biosensoren
	Muskeln		Elektromyografie

Den Anfang bildet eine Darstellung von Methoden zur Abbildung der Umwelt. Dieses Unterkapitel hat eine Sonderrolle, da es sich nicht konkret um Messmethoden handelt, sondern um hilfreiche Ergänzungen, mit denen räumliche Gegebenheiten für Studien zur Erfassung menschlicher Wahrnehmungs- und Verhaltensweisen geschaffen werden.

Anschließend werden im zweiten Unterkapitel Messverfahren zur Erfassung von (Verhaltens-)Reaktionen dargestellt. Einige der hier vorgestellten Methoden wurden bereits in den vorangegangenen Studien (z. B. Bewegungsdaten) eingesetzt, andere basieren auf ähnlichen Herangehensweisen Die Erhebung individueller (Verhaltens-)Reaktionen können sowohl auf Basis subjektiver Einschätzungen von Befragten als auch mithilfe von objektive Messmethoden durchgeführt werden. Während selbst berichtete Daten jedoch dem Risiko unterliegen, durch Störungen oder Verfälschungen negativ beeinträchtigt zu sein, unterliegen Daten, die aus standardisierten Verfahren gewonnen werden, weniger Einschränkungen.

Dem schematisch modellierten kognitiven Ablauf folgend wird im dritten Unterkapitel die Wahrnehmung betrachtet und Methoden zu deren Erfassung aufgezeigt.

Der Hauptfokus des Ergebniskapitels liegt auf dem Kernstück kognitiver Systeme, den Abläufen in der Psyche und im Körper des Menschen. Neurologische Messmethoden werden im vierten Unterkapitel und Methoden zur Erfassung physiologischer Reaktionen im letzten Unterkapitel vorgestellt. Um einen detaillierteren Einblick in diese Methoden zu erhalten, werden sie in einem Steckbrieformat präsentiert. Jeder Steckbrief liefert eine Definition der Methode, Anwendungsbeispiele im urbanen Kontext, Informationen über die benötigte Technik, die zu erhebenden Daten, mögliche Orte der Anwendung und die benötigte Zeit bzw. die Dauer der Durchführung. Außerdem wird der Ablauf der Messung beschrieben und mögliche Fehlerquellen genannt. Die Wirtschaftlichkeit wird auf Basis eines Kosten-Nutzen-Verhältnisses und der Komplexität beurteilt. Den Abschluss bildet eine Einschätzung zur

Übertragbarkeit der Methode auf den Kontext Innenstadtentwicklung und zu möglichen Kombinationsmöglichkeiten dieser mit anderen Messmethoden.

4.1 Methoden zur Abbildung der Umwelt

Die Wahrnehmungen und Reaktionen des Menschen werden durch die Umgebung, in der er sich befindet, beeinflusst. Es ist jedoch nicht immer möglich, die Messung an dem Ort durchzuführen, welcher für eine Forschungsfrage oder zur Lösung eines praktischen Problems relevant ist. Zum einen kann dies daran liegen, dass eine Abwägung zwischen alternativen Ausgestaltungen des Ortes oder Gebäudes, für welches der Zusammenhang zwischen Mensch und Umwelt untersucht werden soll, geplant ist, oder das Objekt noch gar nicht existiert. In der jüngeren Vergangenheit wurden deshalb Anwendungen sog. erweiterter und virtueller Realitäten (eng. Augmented Reality (AR); Virtual Reality (VR)) eingesetzt. Sie bieten die Möglichkeit, vielversprechende Ergebnisse darüber liefern zu können, warum und wie Menschen physiologisch mit Orten und Objekten verbunden sind (Camargo et al., 2021).

4.1.1 Erweiterte Realität vor Ort simulieren

AR wird als computergestützte Darstellung der realen Welt mit virtuellen Erweiterungen definiert (Markgraf, 2018). Die Technologie ermöglicht es somit, virtuelle Objekte in der realen Umgebung zu platzieren, um neurokognitive Prozesse, wie die Wahrnehmung, welche durch das visuelle Umfeld beeinflusst wird, außerhalb von Laborumgebungen zu testen (Krugliak/Clarke, 2022). AR erlaubt bei Untersuchungen ausgewählte Schlüsselvariablen zu manipulieren, um die Unterschiede in der Wahrnehmung zu überprüfen. Im Kontrast zu VR wird so nicht die gesamte Umgebung simuliert, sondern es werden lediglich virtuelle 3D-Objekte in beliebiger Anzahl in der realen Umgebung eingebunden dargestellt (Florescu/Nistor, 2020). Dieser Unterschied ermöglicht Forschenden ein höheres Maß an experimenteller Kontrolle. Die Probanden bekommen die virtuellen Ergänzungen in der physischen Umgebung dargestellt, indem sie mobile Geräte oder spezielle Kopfbedeckungen während des Experiments tragen. AR wird bereits häufig bei Renovierungs- und Instandhaltungsprojekten im Außenbereich von Gebäuden (Sato et al., 2016) eingesetzt. Ebenso wird die Technologie im Bereich des Designs von gebauten Umwelten, wie der Stadtgestaltung, verwendet. AR-Darstellungen und -Tools werden genutzt, um beispielsweise dabei zu helfen, remote und lokal kollaborative Prozesse der Gestaltung zu unterstützen (Moloney, 2006; Seichter, 2004). Experimente mit AR im Zusammenhang mit der kognitiven Affordanz in der bebauten Umwelt belegen, dass die Manipulation der Umgebung dazu beitragen kann, bestimmte emotionale Zustände hervorzurufen oder zu verstärken (Florescu/Nistor, 2020). Die Autoren leiten aus dieser Erkenntnis ab, dass AR maßgeblich dazu beitragen kann, die Idee einer gebauten Umgebung, welche an die Bedürfnisse der Nutzer

angepasst ist, voranzutreiben. Auch andere Studien setzen sich mit den Potenzialen von multidisziplinären Ansätzen mit AR auseinander, um ein stärker auf den Menschen ausgerichtetes Verständnis der gebauten Umwelt zu erlangen (Andreani/Sayegh, 2017). Das Paper von Qureshi et al. (2018) zeigt die Möglichkeiten von AR, VR und Mixed Realities auf, um Nutzern das Erkunden von Städten zu erleichtern. Dazu wird die sog. CityApp verwendet, welche für den Einsatz in der breiten Öffentlichkeit entwickelt ist (CityAR, 2024). Abschließend wird darauf hingewiesen, dass in der wissenschaftlichen Literatur ein noch nicht abgeschlossener, kontroverser Diskurs darüber geführt wird, ob der Einsatz von AR zu einer kognitiven Überlastung der Nutzer führen kann (El Asmar et al., 2021).

4.1.2 Virtuelle Laborbedingungen schaffen

VR-Umgebungen bezeichnen computergenerierte Simulationen einer dreidimensionalen Umgebung (Wald/Rohrbach, 2024). Die Technologie basiert auf den Schlüsselkonzepten „Immersion“ (die Tiefe des technologischen Eintauchens) und „Presence“ (das Geüh‚l wahrhaftig im virtuellen Raum zu sein) (Liberatore/Wagner, 2021). Bei VR werden also Erfahrungen mit den Sinnen und der Wahrnehmung unter kontrollierten Laborbedingungen stimuliert (Bohil et al., 2011; Kuliga et al., 2015). Die Nutzenden können in der virtuellen Umgebung in Echtzeit interagieren, indem sie spezielle elektronische Ausrüstung (z. B. Datenbrille und -handschuhe) tragen. In der Praxis nutzen die Bereiche Architekt, Ingenieur- und Bauwesen VR bereits vielfältig, vom Planungsprozess, über Simulationen bis hin zur Projektkommunikation. Der Literaturüberblick von Zhang et al. (2020) über VR-Applikationen im Bereich der gebauten Umwelt zeigt, dass einige Beiträge sich auf menschliches Verhalten und Wahrnehmung fokussieren. Insbesondere werden dabei bislang Themen wie Evakuierung, architektonische Gestaltung, Wegeführung, Bewohnerverhalten, thermische Behaglichkeit und nutzerzentrierte Gestaltung behandelt. Besonders der zuletzt genannte Aspekt der nutzerzentrierten Gestaltung (z. B. Heydrian et al., 2015) zeigt, dass VR-Simulationen in der Forschung der gebauten Umwelt zur Bewertung der Qualität und ihrer Auswirkungen dazu beitragen können, bislang vorherrschende Datenerhebungsmethoden (Nutzerbefragung, z. B. durch Umfragen oder Interviews) zu überwinden und stattdessen stärker datengesteuerte Ansätze einzusetzen (Hu/Roberts, 2020). Ein Beispiel dafür ist der Einsatz von VR zur Entscheidungsfindung von Standortentscheidungen, topografischen Ausgestaltungen oder der Wegeführung (Bohil et al., 2011). Ein konkretes Beispiel zur Verwendung von VR zeigen Anderson et al. (2017) in ihrem Beitrag über Entspannung durch immersive Naturszenen. Die Autoren erkennen in dieser Studie, dass das autonome Nervensystem des Menschen stärker auf Entspannung reagiert, wenn der Mensch mehr Natur ausgesetzt ist. Auch für den städtischen Raum werden biologische Vorteile durch die Interaktion des Menschen mit der Natur beschrieben (Giray Küçük/Yüceer, 2022).

Kuliga et al. (2015) resümieren in ihrer Studie, welche die Analogie zwischen Kognition, Verhalten und Erfahrungen des Nutzers in realen und virtuellen Umgebungen untersucht, dass VR ein starkes Potenzial als empirisches Forschungsinstrument für die Umwelt- und Verhaltensforschung aufweist. Zugleich bleiben zwei grundlegende Herausforderungen zum Einsatz von VR in der Forschung der Wahrnehmung und des Verhaltens von Menschen bestehen. Erstens muss in weiteren Studien erforscht werden, wie realitätsnah VR-Umgebungen sein können und müssen, und zweitens bleibt die Frage bislang unzureichend beantwortet, wie sich die reale gebaute Umwelt mit einer realistischen Wahrnehmung der physischen Umgebung, beispielsweise durch die visuellen und akustischen Sinne, optimal simulieren lässt (Kim et al., 2013; Zhang et al. 2020).

4.2 Erfassung von (Verhaltens-)Reaktionen

Menschliche Reaktionen können sehr vielfältig ausfallen. In den vorangegangenen Studien wurden bereits einige Methoden eingesetzt, mithilfe derer das Verhalten von Menschen erfasst werden kann. In diesem Kapitel werden, unterteilt in Messmethoden zur Erfassung von Menschengruppen bzw. Individuen, Verfahren vorgestellt, mit denen Bewegungen und (Verhaltens-)Reaktionen erfasst werden können, die in der Folge einer Interaktion des Menschen mit seiner Umwelt entstehen.

4.2.1 Fokus auf Menschengruppen

Das Verhalten von Menschen ist hochkomplex und sehr individuell. Im Stadtkontext ist es jedoch nicht leicht möglich, einzelne Individuen isoliert vorzufinden, da eine hohe Bevölkerungsdichte und Frequenz herrschen. Aus diesem Grund, und um kollektives Verhalten zu verstehen, werden häufig Menschengruppen untersucht. Bevor der Fokus auf den einzelnen Menschen und dessen Wahrnehmung und Verhaltensweisen gelegt wird, werden deshalb nachfolgend zuerst Methoden vorgestellt, mit denen mehr als ein Mensch auf einmal erfasst werden kann.

Lauftracking

Positionsbestimmungssysteme und mobile Geräte

Das Global Positioning System (GPS) ist das vielleicht bekannteste Positionsbestimmungssystem. Es handelt sich bei GPS um eine Methode zur Standortbestimmung mittels Trilateration (Blewitt, 1997) und kann auf mobilen Geräten, z. B. Mobiltelefonen oder Smartwatches, verwendet werden. So können beispielsweise Laufwege von Fußgängern in Innenstädten dokumentiert werden (Spek, 2009). Ein wesentlicher Vorteil des GPS-Trackings ist die hohe zeitliche und räumliche Auflösung der erfassten Daten (Shoval, 2008). Neben der positionsbezogenen Komponente kann Tracking auch zur Erfassung der

Aktivität von Menschen eingesetzt werden. Im urbanen Kontext wird dies untersucht, indem Studienteilnehmende Aktivitätsmessgeräte (z. B. eine Fitbit-Zip oder einen triaxialen Beschleunigungssensor) tragen, welche ihre körperlichen Aktivitäten aufzeichnen (Auerswald et al., 2022; Kurita et al., 2020). Studien haben bisher den Zusammenhang zwischen der physischen Aktivität und altersbedingten kognitiven Beeinträchtigungen untersucht (Auerswald et al., 2022; Kurita et al., 2020). Die Messergebnisse des Trackings können jedoch durch Umweltfaktoren beeinflusst werden, da sie das Verhalten der Teilnehmenden verändern, etwa durch eine reduzierte Aktivität bei schlechtem Wetter (Auerswald et al., 2022). Zudem kann die Tragekonsistenz der Messgeräte oder eine mangelnde Anzahl an Satellitensignalen die Genauigkeit der Daten beeinträchtigen. Ergänzend zum Tracking kann ein elektronisches Tagebuch eingesetzt werden, um den Kontext der Aktivitäten genauer zu erfassen (Mengelkoch et al., 2023).

LiDAR-Sensoren

LiDAR (Light Detection and Ranging) ist ein Verfahren, bei dem gepulstes Laserlicht ausgesendet, von Objekten reflektiert und vom LiDAR-Sensor erfasst wird (IBM, 2024). Dabei wird der Zeitverzug, die Amplitude oder Frequenz des gepulsten Lichts gemessen (Palmer/Shan, 2002). Auf diese Weise lassen sich Entfernungen präzise bestimmen und dreidimensionale Modelle von (urbanen) Räumen erstellen (Wang et al., 2018). Es existieren vier Arten von LiDAR-Messungen: terrestrisch, mobil, slam (simultaneous localization and mapping) und aus der Luft (Garnett/Adams, 2018). Der Vorteil der Nutzung von LiDAR-Sensoren besteht in der schnellen und sehr detaillierten Erstellung von digitalen Geländemodellen (eng. digital terrain models (DTMs)) (Palmer, 2002). Die durch LiDAR generierten Modelle können als Grundlage für städtische Planungen verwendet werden, beispielsweise wenn es um die Entwicklung von klimaresilienten und smarten Städten geht (Garnett, 2018). Daneben können aber auch menschenbezogene Planungen mithilfe von LiDAR-Messungen vereinfacht werden. Beispielsweise kann die Fußgängerfreundlichkeit von Innenstädten im Modell untersucht werden (Belkouri/Laing, 2024). Der Datenanbieter Hystreet misst die Passantenfrequenz innerstädtischer Einzelhandelslagen an 365 Tagen rund um die Uhr in elf Städten in sechs Ländern (Hystreet, 2024). Mithilfe dieser Präsenzdaten sollen zukunftsfähige Innenstädte entwickelt werden können.

Räumliche Konfiguration

Space Syntax

Space Syntax ist ein analytischer Ansatz, der darauf abzielt, den Zusammenhang zwischen (urbanen) Räumen und menschlichem Verhalten zu untersuchen (Hillier, 2014). Eine zen-trale

Annahme des Space Syntax ist, dass die Räume, in denen Menschen sich bewegen, aktiv ihre Verhaltensweisen beeinflussen. Beispielsweise können, unter der Prämisse, dass sich Menschen linear und entlang ihrer Sichtlinie bewegen, Laufrouten vorhergesagt werden (Li/Klippel, 2010). Außerdem kann Space Syntax die räumliche Wahrnehmung von Menschen erklären und somit einen Beitrag zur entsprechenden Stadtgestaltung leisten (Vaez et al., 2016; Karimi, 2012). Die Analyse des Space Syntax erfolgt meist mithilfe einer „axialen Karte" (einer Sichtlinienkarte der Stadt). „Einfache" bzw. direkt sichtbare Orte werden, Hillier (2014) zufolge, am häufigsten besucht. Ein Problem dabei ist, dass bei Sichtbarkeit eines Ortes sofort die Erreichbarkeit (unabhängig von der Topografie oder anderen Faktoren) unterstellt wird (Pafka et al., 2020). Zur Lösung dieses Problems könnten ergänzend digitale Höhenmodelle genutzt werden, die durch Fotogrammetrie (vgl. LiDAR) generiert werden (Ratti, 2005). Die Space-Syntax-Technik wird auch zur Erforschung von Wegfindung in komplexen mehrstöckigen Gebäuden eingesetzt, um Strategien für die vertikale Navigation abzuleiten und Layouts zur besseren Orientierung vorzuschlagen (Hölscher et al., 2012).

4.2.2 Fokus auf Individuen

(Verhaltens-)Reaktionen sind stark von individuellen Bedürfnissen, Situationen und Präferenzen beeinflusst. Zur menschenzentrierten Gestaltung von Städten müssen individuelle Unterschiede verstanden und berücksichtigt werden. Nur so können für eine breite Vielfalt von Menschen zugängliche, funktionale und angenehme Orte gestaltet werden. Erhebungsansätze zur Erfassung der dazu elementaren Daten können subjektiv und objektiv gestaltet sein.

4.2.2.1 Subjektive Erhebungsansätze

Subjektive Erhebungsansätze bergen die Gefahr von Bias. Dennoch werden viele der in dieser Studie vorgestellten Messmethoden durch Interviews oder Umfragen begleitet. Darüber hinaus können sie mehrere Dimensionen des kognitiven Systems abdecken. Anhand von zwei exemplarischen Studien wird nachfolgend kurz auf die Einsatzmöglichkeiten von Interviews und Umfragen im urbanen Kontext eingegangen und anschließend werden einige Methoden zur Erfassung von Gefühlen und Emotionen exemplarisch vorgestellt.

Methoden zur Erfassung des Erlebens

Die beiden wissenschaftlichen Methoden des Interviews und der Umfrage dienen der (gezielten) Befragung von Personen zu einem bestimmten Thema. Die so erhobenen Daten werden anschließend ausgewertet, um eine Forschungsfrage und Zielstellung zu beantworten. Beide Methoden können qualitativer und quantitativer Natur sein und sowohl persönlich also auch telefonisch oder online durchgeführt werden.

Umfrage

Im Zusammenhang mit der Stadtforschung werden subjektive Erhebungsansätze verwendet, um Primärdaten auf individueller Ebene zu sammeln. Dabei liegt der Fokus auf Verhaltensweisen und Einschätzungen der Menschen oder ihren qualitativen Bewertungen verschiedener Aspekte des städtischen Lebens (Garau/Pavan, 2018). So wird beispielsweise in Studien der Stadtforschung auf selbst berichtete Daten zu Gesundheit, Wohlbefinden und Erfahrung in Kombination mit Daten aus geografischen Informationssystemen (GIS) aufgebaut, um Zusammenhänge zwischen subjektivem Wohlbefinden und räumlichen Faktoren städtischer Gebiete zu untersuchen (Ala-Mantila et al., 2017). Basierend auf den Umfrageergebnissen einer Studie von Ala-Mantila et al. (2017) konnte so beispielsweise gezeigt werden, dass Zusammenhänge zwischen dem subjektiven Wohlbefinden und räumlichen Faktoren bestehen. Die Wirkungsrichtung blieb jedoch in ungeklärt. Die Grenze von Umfrageergebnissen wird besonders an folgendem Beispiel noch einmal deutlich: Gemäß den Studiendaten weisen zentrale Fußgängerzonen eine hohe Lebensqualität auf, während die höchste Zufriedenheit in autoorientierten Zonen verzeichnet wird.

Interviews

Neben dem Wohlbefinden ist auch das empfundene Sicherheitsgefühl eine Wahrnehmung des Menschen, die im Kontext der Stadtforschung eine wesentliche Rolle spielt. So wird auch die wahrgenommene Sicherheit in Studien mithilfe einer Kombination aus GIS-Daten, Umfrageergebnissen und Interviews untersucht (Bennetts et al., 2017). Das Ergebnis dieser Analyse der baulichen Umwelt und der subjektiven Einschätzungen zeigt, dass unterschiedliche Faktoren zum Sicherheitsgefühl der Menschen beitragen, darunter Aktivität, Vertrautheit, Instandhaltung und Stadtgestaltung (Bennetts et al., 2017).

Methoden zur Erfassung von Gefühlen und Emotionen

Neben den beiden traditionellsten Formen, Interview und Umfrage, existieren eine Reihe von weiteren Methoden zur Erfassung subjektiver Eindrücke. In dieser Studie soll auf drei Methoden eingegangen werden, welche Gefühle und Emotionen erfassbar machen: Elektronisches Tagebuch, Phänomenologische Tests und Gefühlskarten. Zahlreiche kognitivwissenschaftliche Untersuchungen zeigen den Vorteil dieser Methoden gegenüber Interviews und Umfragen. Er besteht darin, die komplexen Prozesse, welche bei der Formulierung von Antworten auf retrospektive Fragen ablaufen, zu umgehen, um eine ungefilterte Perspektive zu erlangen (Piasecki et al., 2007).

Elektronisches Tagebuch

Die Methodik des Elektronischen Tagebuchs (eng. Electronic diaries/Ecological Momentary Assessment) lädt dazu ein, Empfindungen des Menschen zu reflektieren (Palmberger, 2022). Die Empfindungen werden durch die Teilnehmenden meist in Form von schriftlichen Einträgen, aber optional auch durch Sprachaufnahmen oder visuelle Formen der Darstellung in einem digitalen Tagebuch festgehalten und elektronisch an die auswertende Person übermittelt. Die Auswertung der Tagebucheinträge ermöglicht es, dynamische Prozesse (sog. „momentary mechanisms"), wie sie bei psychischen Symptomen auftreten, zu erfassen, da diese ständig über externe Stressoren oder durch interne Adaptionsprozesse reguliert werden (Ebner-Priemer et al., 2019). Von hoher Relevanz ist bei der Auswertung des Tagebuchs eine möglichst detaillierte Kenntnis über den Kontext, im dem sich der Teilnehmende beim Notieren seines Eintrags befindet. Im Kontext urbaner Studien können elektronische Tagebücher eingesetzt werden, um die Lebensqualität der Teilnehmenden im Zusammenhang mit der gebauten Umwelt, in der sie sich bewegen, zu erfassen (Piasecki et al., 2007). Dazu wird die Methode häufig mit GPS-Trackings kombiniert. Mithilfe dieser Kombination konnte in Studien bereits der Zusammenhang zwischen dem Aufsuchen von Grünflächen und deren vermutetem positiven Einfluss auf das Wohlbefinden analysiert werden (Lederbogen et al., 2011). Weiterführende Untersuchungen der sog. „grünflächeninduzierten Stimmungsverbesserung" mit selbiger Methodenkombination und zusätzlich bildgebenden Verfahren für neurobiologische Korrelate belegt, dass „der Effekt von Grün für verschiedene Personen unterschiedlich stark ausfällt" (Ebner-Priemer et al., 2019, S. 1208). Auch mithilfe sog. Geographical Ecological Momentary Assessment (GEMA) können psychologische Zustände von Teilnehmenden im urbanen Kontext erfasst werden (Mengelkoch et al., 2023; Mennis et al., 2018). So stellte Hammoud et al. (2024) fest, dass sich Naturvielfalt positiv auf das mentale Wohlbefinden auswirkt. Jedoch sind auch elektronische Tagebücher, wie Interviews und Umfragen, nicht frei von unerwünschten Varianzen oder Fehlern. Eine detaillierte Übersicht über die Grenzen der Methode bietet der Beitrag von Piasecki et al. (2007).

Phänomenologische Tests

Phänomenologie wird als das Studium und die Beschreibung von Phänomenen definiert (Kühne, 2024). Phänomenologische Ansätze zielen demnach darauf ab, spezifische Phänomene so zu identifizieren, wie sie in einer bestimmten Situation von den Probanden bewusst erfahren werden (Giorgi, 2009). Besonders geeignet ist die Kombination von phänomenologischen Tests mit anderen Methoden, um die komplexe Natur vieler Forschungsfragen zu adressieren (Mayoh/Onwuegbuzie, 2013). In der Psychologie und Stadtforschung werden solche Mixed Methods bereits in Studien verwendet, beispielsweise

um das sinkende subjektive Wohlbefinden von Stadtbewohnern in der chinesischen Stadt Shenzhen zu untersuchen (Kerstetter et al., 2022). Es gelang den AutorInnen, fünf „Quellen des Glücks“ zu identifizieren, zu denen auch das breitere physische Umfeld zählte. Insbesondere verbesserte öffentliche Verkehrsmittel (z. B. U-Bahn, Busse und gemeinsame Fahrräder), mehr Grünflächen und Parks, die Sauberkeit des öffentlichen Raums und eine bessere Luftqualität werden als Aspekte genannt, die im positiven Zusammenhang zum empfundenen „Glück“ bzw. Wohlbefinden der Teilnehmenden stehen. Ein weiteres Beispiel für den Einsatz von phänomenologischen Tests im Kontext urbaner Zusammenhänge ist die phänomenologische Landschaftsforschung (Kühne, 2024). Diese geht davon aus, dass das Erleben von Landschaft durch den Menschen nicht ausschließlich durch die Gegebenheiten geprägt wird, sondern auch von Veränderungen dieser, sowie von persönlichen Kenntnissen und der Stimmung des Menschen abhängt (Rebay-Salisbury, 2013). Die wechselseitige Durchdringung von Mensch und Landschaft wird hierbei, ähnlich den kognitionswissenschaftlichen Gedanken, als „embodied acts of landscaping“ bezeichnet (Berleant, 1998). Aufgrund des individuellen Erlebens und dem individuellen Zuwenden des Befragten unterliegen phänomenologische Tests allerdings der Kritik, dass Verallgemeinerungen von Ergebnissen schwer möglich sind.

Gefühlskarten

Gefühlskarten (eng. Feeling Maps) ermöglichen das Erfassen emotionaler Reaktionen der Menschen auf ihre Umgebung, beispielsweise während sie durch ein bestimmtes Stadtgebiet gehen (Rosenberg Weinreb/Rofé, 2013). Die Methode lässt sich in die Gruppe der kognitiven Kartierungs- und Umweltpräferenztechniken (eng. Cognitive mapping and environmental preference techniques) einsortieren. Mithilfe von Gefühlskarten kann in Studien gezeigt werden, dass die Gefühle der Menschen gegenüber bestimmten Orten durch deren physische Merkmale bestimmt werden. Zahlreiche Belege, häufig basierend auf Case Studies, bescheinigen Natur und Pflanzen eine positive Wirkung für Menschen und städtischen Umgebungen hohe Stresswerte (Rosenberg Weinreb/Rofé, 2013). In einer Studie, die Angst und Komfort mithilfe von Gefühlskarten misst, wurde retrospektiv auf die Erinnerung der Befragten an Situationen der Vergangenheit zurückgegriffen (Matei et al., 2001). Die Erkenntnisse aus Gefühlskarten können durch die Integration von tragbaren Biosensoren kombiniert werden, um emotionale Empfindungen in Echtzeit zu erfassen und einer Umgebung zuzuordnen (Al-Husain et al., 2013). Darüber hinaus können Gefühlskarten durch physiologische Signale gemessener Erregung ergänzt werden. Diese können in Form von galvanischen Hautreaktionen (eng. Galvanic skin respons (GSR)) erhoben werden, um emotionale Erregung an einem geografischen Ort zu erfassen (Nold, 2006). Alajmi et al. (2013) beschreiben den Einsatz von Gefühlskarten, in Kombination mit tragbaren Bio- und

Zugangssensoren, im Umfeld eines Einkaufszentrums zur Erhebung der Kundenzufriedenheit mit den Geschäften bzw. des Einkaufserlebnisses. Trotz vielfältiger Einsatzmöglichkeiten ist eine Hauptkritik an Gefühlskarten und ihren Kombinationen mit Sensorik, dass nicht mit Sicherheit festgestellt werden kann, ob die emotionalen Einträge oder physiologischen Signale tatsächlich die Gefühle der Nutzenden gegenüber dem georeferenzierten Ort beschreiben oder durch andere situative Einflüsse hervorgerufen werden (Al-Husain et al., 2013).

4.2.2.2 Objektive Erhebungsansätze

Objektive Erhebungsansätze bilden die nächste Qualitätsstufe zur Vermessung menschlicher Wahrnehmungs- und Verhaltensweisen – bezogen auf eine möglichst verfälschungsfreie Datenerhebung. Die messbaren und überprüfbaren Beobachtungen und (Verhaltens-) Reaktionen sind frei von persönlichen Einschätzungen und bieten deshalb ein höheres VergleichsPotenzial sowie eine objektive Grundlage für die Forschung.

Bewegungsanalysen

Die Bewegungsanalyse bezieht sich meist auf den medizinischen Bereich und umfasst die Untersuchung einzelner Körperteile, die ganzheitliche Analyse mittels einer oder mehrerer Kameras sowie die Erkennung menschlicher Bewegungsabläufe anhand von Bildsequenzen (Aggarwal/Cai, 1997). Im urbanen Kontext umfasst die Bewegungsanalyse die Aufzeichnung von Bewegungsmustern, beispielsweise mithilfe von Wärmebildkameras. Diese Daten können als Grundlage für stadtplanerische Entscheidungen genutzt werden, um urbane Räume effizienter und nutzerorientierter zu gestalten (Poulsen et al., 2012). Die ermittelten Bewegungsflüsse können durch gezielte Designstrategien beeinflusst werden. Vroman/Lagrange (2017) zeigen, dass die strategische Platzierung von Hindernissen die Laufwege, die Laufgeschwindigkeit sowie den Laufrhythmus beeinflussen kann. Daneben haben Bewegungsanalysen auch eine besondere Relevanz für die mentale Gesundheit und das kognitive Altern von Menschen. Studien zeigen, dass körperliche Bewegung eine entscheidende Rolle bei der Erhaltung von grauer und weißer Gehirnsubstanz spielt und somit den Verlust kognitiver Funktionen verhindern kann (Sigmundsson et al., 2022). Diese Erkenntnisse könnten ebenfalls in der Stadtgestaltung berücksichtigt werden, um positive Effekte auf die Gesundheit der Bevölkerung zu erzielen. Ein Nachteil von Bewegungsanalysen ist der hohe Zeitaufwand bei der Erhebung der Daten (Simon/Johnson, 2000).

Feldstudien

Feldstudien sind Untersuchungen, die in natürlicher Umgebung durchgeführt werden (Xiao/Milgram, 2015). Sie ermöglichen Forschenden, Verhaltensweisen in natürlicher Umgebung zu beobachten, und liefern Daten, die unter Laborbedingungen zu erheben

teilweise nicht möglich wären (Grzyb/Dolinski, 2021). Feldstudien zeichnen sich durch ihre langfristige Natur und ihren realen Kontext aus und bieten umfassende Einblicke in das Verhalten und die Nutzungsmuster der Teilnehmer (Rahmati/Zhong, 2013). Feldstudien sind besonders wertvoll für die Bewertung mobiler und ortsabhängiger Verhaltensweisen sowie sozialer Interaktionen (Rahmati/Zhong, 2013) und spielen somit eine entscheidende Rolle in der wissenschaftlichen Forschung zur gebauten Umwelt, da sie Einblicke in die komplexen Beziehungen zwischen Gebäuden, Bewohnern und ihrer Umgebung bieten (Toit/Mouton, 2013). Als Beispiel dafür können Feldstudien herangezogen werden, die in rund dreißig verschiedenen Räumen in über einem Dutzend moderner und historischer Gebäude in London durchgeführt wurden (Yannas, 2009). Diese Studien umfassen Messungen und Kartierungen der Aktivitäten und Umweltpräferenzen der Bewohner und liefern Daten für parametrische Studien, die zur Entwicklung neuer Bauprogramme und Forschungspläne verwendet wurden. Eine weitere Feldstudie wurde im Bereich der Wohnzufriedenheit in Wohnungen für Menschen mit niedrigem Einkommen durchgeführt. Die Ergebnisse früherer Studien sowie diese Feldstudie zeigen, dass die Schaffung benutzergerechterer Umgebungen ein wechselseitiger Prozess ist. Dieser Prozess erfordert nicht nur eine detailliertere Berücksichtigung der Bedürfnisse der Benutzer durch die Designer, sondern auch ein grundlegendes Wissen über gebaute Umgebungen seitens der Benutzer (Kar/Sarkar, 2017). Von besonderer Wichtigkeit ist es, bei Feldstudien potenzielle Verzerrungen und die Gültigkeit der Ergebnisse genau zu beobachten. Dabei gilt es, mögliche Auswirkungen der Beobachtung auf das Verhalten der Teilnehmer zu berücksichtigen und sicherzustellen, dass ihre Analyse die Kriterien der Relevanz, Angemessenheit und Akzeptanz erfüllt, um objektive und belastbare Daten zu erhalten (Atkinson/Shaffir, 1998).

Verhaltenskartografie

Verhaltenskartografie (engl. Behavioral Mapping) ist eine systematische Beobachtungsmethode zur Untersuchung der Beziehung zwischen Menschen und ihrer Umgebung. Sie umfasst die Aufzeichnung von Raumnutzungsmustern in Echtzeit und ermöglicht so ein besseres Management von öffentlichen Bereichen und Infrastrukturen (Bishop et al., 2024). Konkret geht es dabei um die Aufzeichnung des Verhaltens und der Bewegungen der Teilnehmer in gestalteten Räumen (Bahillo et al., 2015; Cosco et al., 2010). Dieser Ansatz kann Diskrepanzen zwischen Gestaltungsabsicht und tatsächlicher Nutzung aufdecken und Forschenden helfen, die Auswirkungen von Umweltfaktoren auf menschliche Aktivitäten zu verstehen (Bahillo et al., 2015). Technologische Fortschritte haben die Methoden der Datenerhebung zunehmend verbessert, sodass sie über die traditionellen „Papier und Stift“-Ansätze hinausgehen und mobile Anwendungen und immersive virtuelle

Umgebungen umfassen (Kumar/Dhar, 2023). Diese Tools ermöglichen die unauffällige Verfolgung von Teilnehmern, die Erfassung von Kontextinformationen und die Visualisierung von Nutzerverhaltensmustern (Bahillo et al., 2015). Die Fähigkeit der Methode, detaillierte Einblicke in die Beziehungen zwischen Umgebung und Verhalten zu geben, macht sie zu einem wertvollen Instrument für die Gestaltung der bebauten Umwelt (Cosco et al., 2010; Darko/Chan, 2021). Die Methode bietet Stadtplanern, Designern und Fachleuten wertvolle Einblicke und ermöglicht es ihnen, die Raumnutzung besser zu verstehen, soziale Interaktionen zu unterstützen und das Infrastrukturmanagement in bebauten Umgebungen zu verbessern (Bishop et al., 2024; Blennerhassett et al., 2018). Die Verhaltenskartografie hat jedoch auch ihre Grenzen, da sie weder die Beweggründe der Menschen für ihr Handeln noch deren subjektive Erfahrungen mit einem Ort erfassen kann. Der Einsatz zusätzlicher Techniken, wie beispielsweise Interviews, kann den Wert der Verhaltenskartografie erheblich steigern, da sie die Beobachtungen mit einem Verständnis für die Beweggründe der Menschen für das Beobachtete erklären können (Bishop et al., 2024).

Video-/Fotodokumentation

Video- und Fotodokumentation spielen in der wissenschaftlichen Forschung in verschiedenen Disziplinen eine entscheidende Rolle. Bei unterschiedlichen Anwendungen verbessern visuelle Dokumentationsmethoden die Qualität der Forschung, erleichtern die Reproduzierbarkeit und liefern wertvolle Beweise für die Analyse und Bewertung wissenschaftlicher Studien. Die Videotechnologie in der sozialwissenschaftlichen Forschung dient als Instrument zur Beobachtung, Datenerfassung und für Feedback-Mechanismen (Rosenstein, 2002). Video- und Fotodokumentation können ebenso für die wissenschaftliche Erforschung der bebauten Umwelt eingesetzt werden. Fotografie und Video ermöglichen es Forschern, temporär vergängliche Beobachtungen und Verhalten in verschiedenen Kontexten aufzuzeichnen und sowohl qualitative als auch quantitative Analysen daraus zu gewinnen (Basil, 2011). Die digitale Dokumentationstechnologie bietet die Möglichkeit, mehr Felddaten in kürzerer Zeit und genauer zu erfassen und dadurch die Zeiten vor Ort zu optimieren. Digitale Dokumentationstechniken in Studien zur landestypischen Architektur verbessern den Interpretationsprozess, von der Untersuchung und Dokumentation bis zur Analyse und Archivierung (Fortenberry, 2019). Diese visuellen Methoden liefern reichhaltige Daten für das Verständnis der Interaktionen zwischen Mensch und Umwelt und die Aufzeichnung architektonischer Details. Die Dokumentation ist ein wichtiges Mittel, um Erkenntnisse an verschiedene Zielgruppen weiterzugeben. Dabei spielen Zeit und verfügbare Ressourcen eine wichtige Rolle. 360-Grad-Videos ermöglichen den Einsatz immersiver Technologien für die

virtuelle ortsbezogene Forschung und ermöglichen Zugang und Analyse von bebauten Umgebungen aus der Ferne (Cinnamon/Jahiu, 2023).

Eine Studie untersuchte in einer Stichprobe 86 städtische und ländliche Gemeinden aus fünf Ländern anhand von Fotos mit dem Ziel, die Gemeinden lebenswerter zu machen und das Zufußgehen zu fördern, um Herz-Kreislauf-Erkrankungen zu senken. Diese Fotos wurden in den Gemeinden nach einem standardisierten Protokoll gemacht. Jedes Fotoset wurde anhand eines Standardformulars bewertet, das speziell für diese Studie entwickelt wurde. Das EPOCH Photo Neighborhood Evaluation Tool und das entsprechende Handbuch wurden von geschulten Bewertern verwendet, um die Fotos systematisch zu bewerten (Chow et al., 2014) Eine weitere Studie bezieht sich auf das Verständnis des menschlichen Verhaltens in der Umwelt durch Aufzeichnung von Verhalten und Handlungen oder durch direkte Interaktion mit Menschen. Der Autor untersucht Forschungs- und Planungsmethoden, die vor allem die visuellen Merkmale der physischen Umwelt betonen (Sanoff, 2016). Darüber hi-naus sind auch Studien bekannt, die Videodokumentation mit EEG-Untersuchungen kombinieren (Karandinou, 2018).

Verhaltensexperiment

Verhaltensexperimente (engl. Behavioral Experiments) sind für das Verständnis menschlichen Verhaltens von entscheidender Bedeutung. Die Experimente lassen sich in verschiedenen Umgebungen durchführen (Mason/Suri, 2012) und umfassen in der Regel mehrere Schlüsselkomponenten, darunter den Versuchsplan, die Präsentation der Stimuli und die Erfassung der Antworten. Das in solchen Experimenten häufig verwendete Training von Verhaltensfähigkeiten besteht aus mehreren Komponenten, wobei das Feedback für die Verbesserung der Leistung besonders wichtig ist (LaBrot et al., 2018). Die Kombination von Verhaltensexperimenten mit Protokollanalysen ermöglicht es, sowohl realisiertes Verhalten als auch kognitive Prozesse zu erfassen (Reypens/Levine, 2017). Auch bei der Analyse der Wechselwirkungen zwischen Mensch und Umwelt bietet diese Methode einige Vorteile, beispielsweise durch eine gezielte Untersuchung der Umweltauswirkungen auf Physiologie und Verhalten, indem sie empirische Beobachtungen mit wissenschaftlichen Messungen verknüpft. Bei Verhaltensexperimenten in bebauten Bereichen werden verschiedene Methoden eingesetzt, um menschliche Reaktionen auf Umweltfaktoren zu bewerten. Kognitive Reaktionen auf die Stadtgestaltung werden mithilfe von Go-/No-Go-Aufgaben untersucht, um die Auswirkungen architektonischer Prinzipien auf die Verhaltensleistung zu testen (Hollander et al., 2021). Moderne Technologien wie Eyetracking, EEG-Scanner und mobile Anwendungen werden eingesetzt, um städtebauliche Attraktionen, Proxemik, Stimmung und

Dynamik zu untersuchen und subtile Merkmale im Städtebau aufzudecken (Andreani/Sayegh, 2017).

4.3 Erfassung menschlicher Wahrnehmung

Im Bereich der Kognition bezeichnet Wahrnehmung die Fähigkeit des Menschen, Informationen der Umwelt, in Form von auftretenden Reizen, durch die Rezeptoren der Sinnesorgane aufzunehmen und zu verarbeiten. Zum Messen der Wahrnehmung gibt es unterschiedliche Methoden, welche sich auf einzelne oder mehrere Sinne beziehen. Ab diesem Kapitel werden die Methoden in Steckbriefform dargestellt. Dies ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit der Methoden untereinander, sodass bei zukünftigen Studien zur Entscheidungsfindung des Forschungsdesigns auf einen breiten Methodenkasten zurückgegriffen werden kann.

4.3.1 Methoden mit Fokus auf einzelne Sinne

In diesem Unterkapitel werden drei Methoden vorgestellt, welche sich jeweils auf einen Sinn konzentrieren: Sehen, Hören und Tasten. Im Kontext menschenzentrierter Gestaltung von (Innen-)Städten ist die Erfassung visueller Reise von besonderer Relevanz. Doch auch auditive und taktile Messmethoden können dazu beitragen, menschliche Wahrnehmungs- und Verhaltensweisen besser zu verstehen. Auf olfaktorische und gustatorische Methoden wurde an dieser Stelle bewusst verzichtet, da diese im gebotenen Kontext eine untergeordnete Rolle spielen bzw. keine Literatur gefunden wurde.

Erfassung des Visuellen

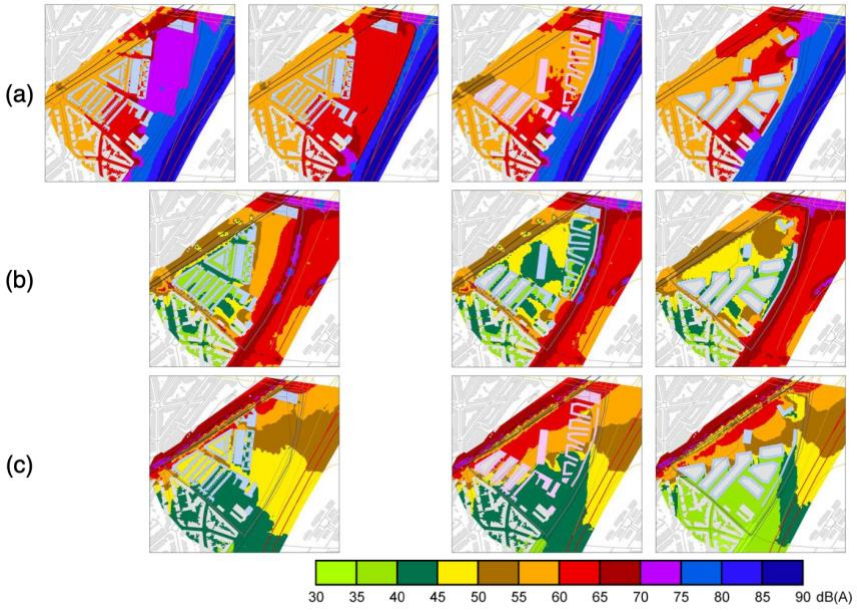
Eyetracking (Wahrnehmung – Sehen)	
Definition der Methode	Das Eyetracking basiert auf der Erfassung und Analyse von Augenbewegungen mithilfe optischer Sensoren und Kameras. Typischerweise wird Infrarotlicht auf das Auge gerichtet, das von der Hornhaut und der Pupille reflektiert wird. Eine Kamera erfasst diese Reflexionen, und spezielle Algorithmen berechnen daraus die genaue Position der Pupille sowie die Blickrichtung. Die Veränderung der Augenposition wird in Echtzeit verfolgt, um zu bestimmen, wohin die Testperson schaut. Moderne Eyetracking-Systeme verwenden oft mehrere Kameras und Sensoren, um eine präzise und robuste Messung zu gewährleisten. (Carter/Luke, 2020)
Anwendung im urbanen Kontext	Li et al. (2020) untersuchen in ihrer Studie die Attraktivität der Umgebung basierend auf dem Grünanteil und erkennen eine große Relevanz von Grünflächen für die Bewertung der Attraktivität von Umgebungen. Bezieht man in den Begriff „urbaner Kontext“ auch Auswirkungen der Innenarchitektur mit ein, so gibt eine weitere Studie unter Einsatz von Eyetracking spannende Einblicke. Darin werden die psychologischen und physiologischen Auswirkungen

	von farbigen Raumausstattungen auf Menschen untersucht und erkannt, dass eine Abhängigkeit zwischen den bevorzugten Farben und den in den Räumen ausgeführten Aktivitäten besteht (Tuszyńska-Bogucka et al., 2020).
Tools	Es wird eine Eyetracking-Brille oder in stationären Anwendungen ein Eyetracker, wie z. B. Tobii EyeX benötigt, welcher auf die Testperson kalibriert sein muss (Carter/Luke, 2020; Funke et al., 2016).
Daten/Datenschutz	Erhebung visueller Daten zu Pupillenposition, Augenbewegung und Blickrichtung.
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	Eyetracking-Studien können prinzipiell überall durchgeführt werden. Die Studiendauer ist abhängig von der gegebenen Anzahl an Eyetracking-Brillen und der gewünschten Teilnehmerzahl. Typischerweise dauert ein Test rund 15–20 min.
Durchführung	Zu Beginn des Tests muss die Eyetracking-Brille auf den Studienteilnehmenden kalibriert werden. Nach einer Kalibrierung und Validierung kann der Blickpunkt anhand der relativen Positionen der Pupille und der Hornhautreflexion mit hoher Genauigkeit geschätzt werden. Während der Teilnehmende sich durch das Untersuchungsgebiet bewegt, werden die Augenbewegungen, die Blickrichtung, die Blick- und Fixierungsdauer gemessen. (Carter/Luke, 2020)
Mögliche Fehlerquellen	Eine Interpretation der Blickhäufigkeit kann fehleranfällig sein, da nicht jede Fixation ein bewusstes Anschauen bedeutet (Carter/Luke, 2020).
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	Die Kosten variieren je nach Anzahl an Teilnehmenden und Qualität der Messung stark. Je nach Studienaufbau ließen sich im Internet Preise zwischen 3.500 € und 30.000 € finden (Wilhelm, 2010). Insbesondere VR-/AR-Eyetracking-Brillen waren in kommerzieller Benutzung und für ca. 900–4.000 € zu kaufen.
Übertragbarkeit & Kombinations-möglichkeiten	Eine Übertragbarkeit ist gut möglich bzw. wird bereits häufig eingesetzt. Eine Kombination mit Zwei-Punkt-Diskrimination (taktile Reize) wird empfohlen (Carter/Luke, 2020). Auch der Einsatz in Verhaltensexperimenten findet statt (Andreani/Sayegh, 2017). Kombinierte Forschungsansätze mit Eyetracking und fNIRS/NIRS und mEEG sind ebenfalls bekannt (Casson/Trimble, 2018; Kopton/Kenning, 2014). Darüber hinaus gibt es VR-Brillen mit integriertem Eyetracking, z. B. das Modell Pico Neo 3 Pro Eye (VRExpert, 2024).

Beispiel-visualisierung	**Abbildung 8: Beispiel einer Eyetracking-Brille (Rey, 2024)**

Erfassung des Auditiven

Soundscape-Analyse (Wahrnehmung – Hören)	
Definition der Methode	Die Soundscape-Analyse untersucht, wie Menschen Geräusche in ihrer Umgebung wahrnehmen, um städtische Bereiche angenehmer zu gestalten. Dabei werden vor Ort Lärmmessungen durchgeführt und Anwohner zu den Geräuschen befragt. Auf diese Weise werden Lösungen zur Lärmminderung und zur Verbesserung der Klangumgebung entwickelt. Die Lösungen können die Gebäudeanordnung oder den Lärmschutz betreffen. (Coensel et al., 2010)
Anwendung im urbanen Kontext	Soundscape eignet sich als Steuerungselement in den frühen Phasen des Stadtplanungsprozesses, mit dem Ziel, die psychische Regeneration in urbanen Orten zu verbessern (Coensel et al., 2010). Da Stadtklang die Lebensqualität beeinflusst, ist die klassische, reine Geräuschreduktion nicht ausreichend. Deshalb ist der weitergehende Soundscape-Ansatz wichtig, welcher ebenfalls die „klangliche Identität“ der Stadt formt (Rehan, 2016). Studien zeigen, dass natürliche Geräusche von Wasser oder Vögel durch einen Großteil der Menschen als angenehm empfunden werden. Auch kulturell geprägte Geräusche wie Kirchenglocken werden als angenehm empfunden. Mechanische Geräusche dahingegen werden grundsätzlich häufiger negativ bewertet (Musik aus Autos, Verkehrsgeräusche etc.). (Zhang/Kang, 2007)
Tools	Es werden ein Schallpegelmesser, eine Schallquelle zur Nachschallmessung, Software zur akustischen Simulation (SAMS, Seewave, Soundecology etc.) und psychoakustische Analysegeräte benötigt.
Daten/Datenschutz	Erhoben werden der Schallpegel (LAeq, dB(A)) (Coensel et al., 2010) zur objektiven Messung der Lautstärke, akustische Signale und psychoakustische Daten wie Lautstärke, Schärfe und Rauigkeit (Zhang/Kang, 2007).
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	Die Durchführung erfolgt am zu untersuchenden Ort (Coensel et al., 2010).

	Beispielsweise werden Langzeitmessungen (> 14 Tage) an festen Punkten und Kurzzeitmessungen (ca. 15 Minuten) mobil durchgeführt (Coensel et al., 2010).
Durchführung	Gemäß Zhang/Kang (2007) läuft eine Soundscape-Analyse wie folgt ab: 1. Akquise von Nutzenden der Orte 2. Befragung während des Aufenthaltes vor Ort in Bezug auf spezifische Geräusche. Messungen während der Bewegung (Soundscape Walk) ist ebenfalls möglich 3. Messung des Schallpegels etc. während der Befragung oder unmittelbar danach
Mögliche Fehlerquellen	Wie Geräusche wahrgenommen werden, ist vom subjektiven Empfinden der Testpersonen abhängig, was die Ergebnisse verzerren kann (Coensel et al., 2010). Hinzu kommen mögliche Bias durch wechselnde Umweltfaktoren wie Temperatur, Licht, Wind, Luftfeuchte und visuelle Elemente, wodurch dieselben Geräusche unterschiedlich bewertet werden können (Zhang/Kang, 2007).
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	Die Kosten sind stark von dem Umfang der Messung abhängig. Aufzeichnungsgeräte, wie z. B. das Song Meter SM4, zur Speicherung von akustischen Signalen über einen längeren Zeitraum, kostet pro Stück ca. 1.000 €. Je nach abzudeckender Fläche werden mehrere dieser Geräte benötigt. Hinzu kommen gegebenenfalls Kosten für die Auswertungssoftware.
Übertragbarkeit & Kombinations-möglichkeiten	Soundscape-Analysen werden bereits im urbanen Kontext genutzt. Häufig findet eine Ergänzung der Analyse durch eine Befragung und/oder (halb)strukturierte Interviews statt.
Beispiel-visualisierung	 **Abbildung 9: Beispiele von Lärmkarten zu a) Autobahnverkehr, (b) örtlicher Straßenverkehr, (c) Eisenbahnverkehr. (Coensel et al., 2010)**

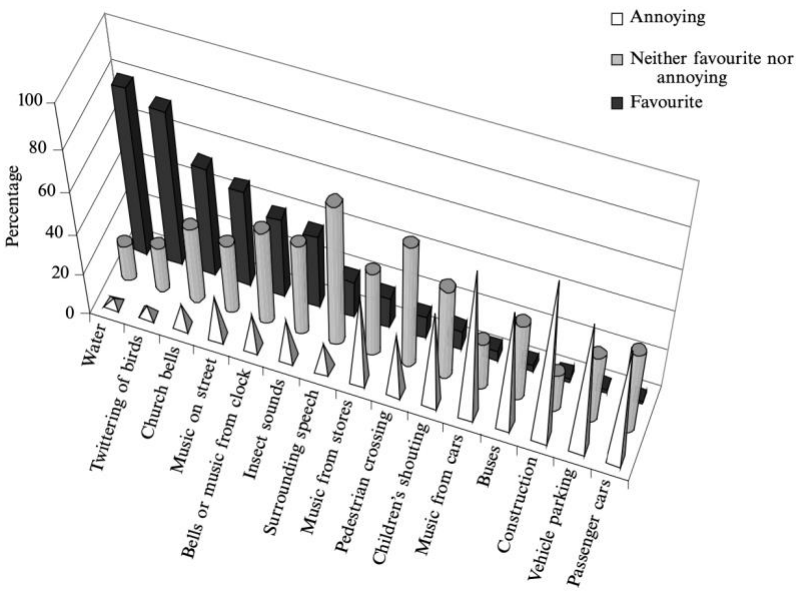
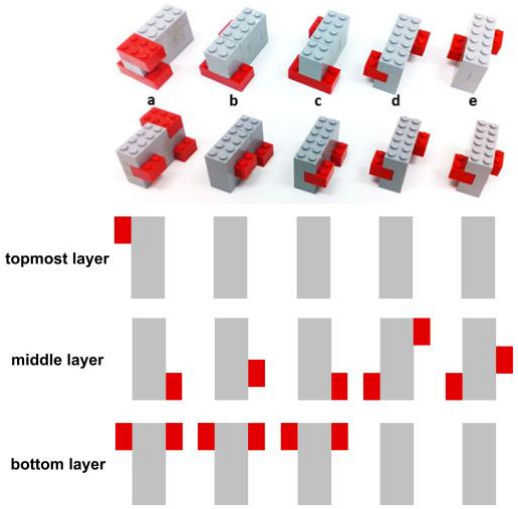


Abbildung 10: Beispiel einer Klassifizierung typischer Geräusche in städtischen Freiräumen (Zhang/Kang, 2007)

Erfassung der Haptik

Kreuzmodaler haptischer Objekterkennungstest und Zwei-Punkt-Diskriminationsmessung (Wahrnehmung – Tasten)	
Definition der Methode	Beim kreuzmodalen haptischen Objekterkennungstest wird die Fähigkeit untersucht, die Form unbekannter Objekte zu ertasten und sichtbaren vorliegenden Objekten zuzuordnen. Dabei wird die haptische Leistung der Teilnehmenden gemessen. Die Zwei-Punkt-Diskriminationsmessung ist ein Verfahren zur Beurteilung der taktilen Sensibilität an den Fingerspitzen. Dabei wird den Teilnehmenden ein Nadelpaar auf die Haut appliziert, und sie müssen angeben, ab welchem Abstand zwischen den Nadeln sie zwei separate Berührungspunkte wahrnehmen. (Kalisch et al., 2012)
Anwendung im urbanen Kontext	Die Messung des menschlichen Tastsinns im urbanen Kontext stellt aufgrund der Komplexität der Umgebungsbedingungen eine Herausforderung dar, was häufig zu ungenauen Ergebnissen führt (Diaconu, 2011). Dennoch wurden im Rahmen von Untersuchungen zur Unterstützung von Menschen mit Seheinschränkungen Ansätze entwickelt, um haptische Parameter zu definieren, die zur Orientierung in städtischen Räumen beitragen können (Herrsens/Heylighen, 2008).
Tools	Für den kreuzmodalen haptischen Objekterkennungstest werden Objekte mit verschiedenen Formen benötigt (beispielsweise aus Kunststoffbausteinen konstruiert). Es existieren mehrere Exemplare jedes Objekts. Die Objekte befinden sich in einem Stoffbeutel. Zudem ist von jedem Exemplar ein Beispiel auf einem Tisch ausgelegt. Zur Zwei-Punkt-Diskriminationsmessung wird die Methode konstanter Stimuli verwendet. In einem speziellen Apparat werden

	zwei Messingnadeln in verschiedenen Abständen zwischen 0 mm und 7 mm befestigt. (Kalisch, 2012)
Daten/Datenschutz	Im Rahmen des Objekterkennungstests wird ermittelt, wie gut Menschen Objekte ertasten und mit visuellen Reizen in Verbindung setzen können. Die Feinfühligkeit der Finger wird beim Zwei-Punkt-Diskriminationsverfahren ermittelt. (Kalisch, 2012)
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	Der haptische Objekterkennungstest kann mobil erfolgen. Es wird lediglich ein Beutel für die Objekte und ein Tisch für die Vorlageobjekte benötigt. Die Zwei-Punkt-Diskriminationsmessung setzt ebenfalls keine spezifischen Räumlichkeiten voraus. (Kalisch, 2012) Für den haptischen Objekterkennungstest wird ein Zeitlimit, beispielsweise von vier Minuten, festgelegt oder die Geschwindigkeit der Erkennung der Objekte gemessen. Vorher wird eine Eingewöhnungsphase gewährt. Der Diskriminationstest hat ebenfalls eine Testphase. Die Dauer der Messung hängt von der Anzahl der Nadelabstände ab, die jeweils eine Sekunde lang getestet werden. (Kalisch, 2012)
Durchführung	Beim haptischen Objekterkennungstest werden die Objekte aus dem Beutel von den Teilnehmenden so schnell und akkurat wie möglich haptisch identifiziert und ausliegenden Objekten zugeordnet, die dieselbe Form haben. Beim Diskriminationstest werden Nadeln in verschiedenen Abständen auf die Finger gesetzt. Die Stimuli dauern jeweils etwa eine Sekunde und wirken mit einer Kraft zwischen 150 und 200 mN. (Kalisch 2012)
Mögliche Fehlerquellen	Es ist schwierig, die Übertragbarkeit der feinfühligen (taktilen) und – normalerweise unterbewusst wahrgenommenen – haptischen Fähigkeiten auf den urbanen Alltag realitätsgetreu zu garantieren.
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	Die Beschaffung bei beiden Methoden ist kostengünstig. Der Nutzen für urbane Untersuchungen ist bisher nur in sehr spezifischen Kontexten (vgl. Anwendungsbeispiel) bekannt.
Übertragbarkeit & Kombinations-möglichkeiten	Die beschriebenen Messmethoden sind für die Anwendung in städtischen Umgebungen nur bedingt geeignet, da sie primär zur Erfassung altersbedingter Verschlechterungen der haptischen und taktilen Fähigkeiten entwickelt wurden (Kalisch, 2012). Haptische Sinneseindrücke könnten in Kombination mit dem emotionalen Wohlbefinden von Menschen untersucht werden (z. B. durch Interview, Umfragen, Gefühlskarten). Beispielsweise haben die innerstädtische Wegbeschaffenheit oder Temperaturbedingungen einen Einfluss auf die menschliche Sinneswahrnehmung beim Laufen (Diaconu, 2011).

Beispiel-visualisierung	 **Abbildung 11: Objekttypen des haptischen Objekterkennungstests (Kalisch, 2012)** **Abbildung 12: Beispielhafter Apparat für die Zwei-Punkt-Diskrimination (OPC Health,2024)**

4.3.2 Messen multimodaler Wahrnehmungen und Synästhesie

Synästhesie bezeichnet die Kopplung mehrerer Sinneseindrücke zu einer Wahrnehmung. Diese physisch getrennten Modalitäten können jedoch auch gemeinsam als multimodale Wahrnehmung erfasst werden.

Multisensorische Integrationstests (Wahrnehmung – diverse Sinne)	
Definition der Methode	Die Messung von elektrophysiologischen Signalen, sogenannten lokalen FeldPotenzialen (eng. Local Field Potenzials (LFP)), ist eine Möglichkeit, die multisensorische Verarbeitung auf der Ebene synaptischer Aktivitäten zu untersuchen. Dabei wird die gebündelte Spannungsänderung in der Umgebung der Elektrodenspitze am Gehirn gemessen. Daraus können Rückschlüsse auf die Gehirnaktivität gezogen werden. (Stevenson et al., 2014)
Anwendung im urbanen Kontext	LFP-Messung wird aktuell vorwiegend zu medizinischen Zwecken zum Beispiel zur Untersuchung der Wirkung von Deep Brain Stimulation zur Heilung von Krankheiten wie beispielsweise Parkinson genutzt (Yin et al., 2021). Aufgrund des notwendigen

	invasiven Eingriffs ist eine Übertragbarkeit zum derzeitigen Zeitpunkt nicht denkbar. Erste prototypische Fallstudien beschreiben jedoch nicht-invasive Ansätze zur Übertragung von multisensorischen Messungen (hier im Sinne von mehreren singulären Methoden, welche gebündelt ausgewertet werden) mit dem Ziel, städtische Qualitäten objektiv quantifizierbar zu machen (Andreani/Sayegh, 2017).
Tools	Bei der Auswahl des Elektrodenmaterials sollte auf Folgendes geachtet werden: Gewebereaktion, allergische Reaktion, Elektroden-Gewebe-Impedanz und radiologische Sichtbarkeit. Gut eignen sich beispielsweise Gold oder Platin. (Geddes/Roeder, 2003) Zusätzlich zu den für die Operation erforderlichen Materialien sind ein Verstärker und ein Computer mit entsprechender Software von entscheidender Bedeutung, um die Signale aufzeichnen zu können (Yin et al., 2021).
Daten/Datenschutz	Die LFP-Messung weist eine Hochfrequenz-Komponente im Bereich von 0,5 bis 3 MHz auf, die lokale neuronale Spikes im Bereich von 150 bis 300 µm detektiert. Des Weiteren umfasst LFP eine Niedrigfrequenz-Komponente unter 200 Hz, die postsynaptische Veränderungen widerspiegelt. Durch LFPs können Informationen über „subthreshold processing“ gewonnen werden. Dies ermöglicht es, präzisere Einblicke in die Funktionsweise größerer neuronaler Netzwerke beim Verarbeiten multisensorischer Reize (z. B. audio-visuelle Reize) zu erhalten. (Stevenson et al., 2014)
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	Die Messung von LFP erfolgt in Kliniken, da das Einsetzen der Elektroden eine Operation notwendig macht (Ekstrom et al., 2007). Die Dauer der Operation variiert je nach Anzahl der eingesetzten Elektroden und kann etwa 3–6 Stunden betragen (IBS Hospital, 2024). Zusätzlich sind die Vorbereitungen für die Operation und Einflussfaktoren, welche vom Probanden abhängen, mit zu berücksichtigen.
Durchführung	LFP-Messung ist eine invasive Methode (Stevenson et al., 2014). Dabei werden Elektroden im Mikrometerbereich entweder an die Gehirnoberfläche oder direkt in das Gehirn der Teilnehmer implantiert (Pesaran, 2010). Die Elektroden registrieren Spannungsänderungen im Gehirn, die sich mithilfe von Signalverstärkern und einer Software aufzeichnen lassen (Yin et al., 2021).
Mögliche Fehlerquellen	Es gibt bislang noch Schwierigkeiten bei der Interpretation von LFPs. Zwar können sie eine bestimmte neuronale Aktivität nachweisen, jedoch können sich Fehler bei der Deutung der elektrischen Signale ergeben, wenn beispielsweise der Ursprung des Si-gnals, die räumliche Entflechtung bzw. zeitliche Dynamik nicht eindeutig bestimmt werden können (Herreras, 2016).
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	Das operative Einsetzen der Elektroden ist mit großem Aufwand und hohen Kosten verbunden.

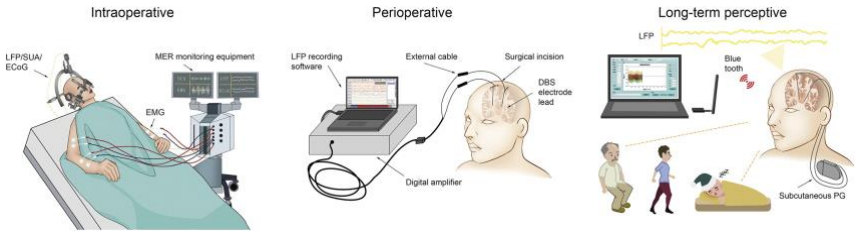
Übertragbarkeit & Kombinations-möglichkeiten	Aufgrund der invasiven Natur dieser Methode wurde die Messung von LFPs bisher kaum für praktische Zwecke angewandt. Da die Methode die Wirkung von zwei Sinnesreizen, wie Geräuschen und Bildern, im Gehirn messen kann, die auch im urbanen Umfeld vorkommen, könnte eine Anwendung im städtischen Kontext prinzipiell sinnvoll sein (Stevenson et al., 2014). Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Methoden sind nicht identifizierbar, aber fMRI und EEG-Messungen eignen sich ebenfalls zur Untersuchung des Zusammenwirkens mehrerer Sinne. (Stevenson et al., 2014).
Beispiel-visualisierung	

Abbildung 13: Beispielhafte Illustration der LFP Aufzeichnung (Yin et al., 2021)

4.4 Vermessen der menschlichen Psyche

Die menschliche Psyche wird häufig als Gesamtheit der mentalen und emotionalen Prozesse beschrieben, welche maßgeblich Wahrnehmung, Denkprozesse, Handlungen beeinflussen. Während das Bewusstsein das bewusste Erleben verantwortet, umfasst das Unterbewusstsein die mentalen Prozesse, welche das Handeln unbewusst mit beeinflussen. Zur Erlangung eines tieferen Verständnisses menschlicher Wahrnehmung und Verhaltensweisen ist es deshalb besonders relevant, über die Selbstauskunft und subjektiven Empfindungen der Menschen hinweg auch ihr Inneres, ihre Psyche besser zu verstehen. Nachfolgend werden neurologische Methoden vorgestellt, welche implizit oder explizit Gehirnaktivitäten messen, um auf Basis dieser Auswertungen die Kognition und Motivation der Menschen besser verstehen zu können.

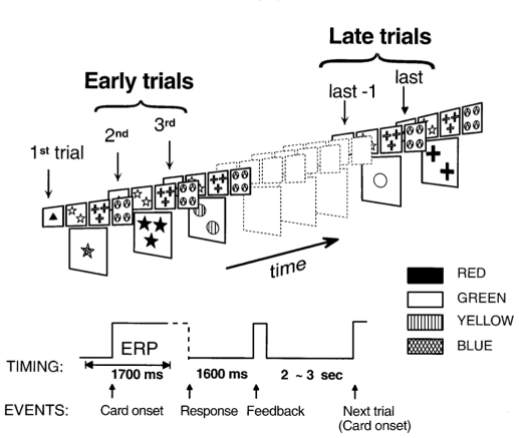
4.4.1 Messung von Gehirnaktivitäten

Als zentrales Steuerungsorgan verarbeitet das Gehirn alle sensorisch wahrgenommenen Informationen, um auf dieser Grundlage die Verhaltensreaktionen des Menschen anzuweisen. Dabei handelt es sich um ein komplexes Zusammenspiel von Nervenzellen (Neuronen), ihren Verbindungen (Synapsen) sowie Aktionspotenzialen (elektrische Signale) und Neurotransmitter (chemische Botenstoffe) innerhalb der verschiedenen Gehirnbereiche. Unterschiedliche Messansätze ermöglichen es, Einblicke in die Funktionsweise des Gehirns zu erlangen. Nachfolgend sind die Methoden in dieser Studie nach indirekten und direkten Messmethoden kategorisiert.

Indirekte Messungen

Bei den indirekten Messmethoden werden die neuronalen Aktivitäten nicht selbst erfasst. Stattdessen wird über beobachtbare Verhaltensweisen auf die kognitiven Prozesse und Gehirnaktivitäten geschlossen. Solche Verhaltensweisen umfassen bspw. Reaktionszeiten oder Fehlerquoten. Während einige Verhaltensreaktionen automatisiert oder unbewusst ablaufen können, erfordern andere Tests bewusste kognitive Kontrolle und Entscheidungen der Probanden.

Wisconsin-Kartensortiertest (Psyche – Indirekte Messung Gehirnaktivitäten)	
Definition der Methode	Der Wisconsin-Kartensortiertest (eng. Wisconsin Card Sorting Test (WCST)) ist ein neuropsychologisches Verfahren, das verwendet wird, um die Fähigkeit zur kognitiven Flexibilität und die exekutiven Funktionen zu messen, insbesondere im Hinblick auf die prä-frontale Hirnaktivität (Barceló, 2001).
Anwendung im urbanen Kontext	Bisher keine Anwendung im urbanen Kontext bekannt.
Tools	Für den WCST benötigt man 60 Antwortkarten mit verschiedenen Mustern (Sterne, Kreuze, Dreiecke und Kreise) in unterschiedlichen Farben (Rot, Gelb, Grün, Blau). Jede Karte enthält ein bis vier identische Muster. (Eling et al., 2008)
Daten/Datenschutz	Es werden Daten zur Messung der Gehirnaktivität aufgezeichnet (EEG-Daten), um die neuronalen Mechanismen zu analysieren, die den Verhaltensweisen zugrunde liegen (Barceló, 2001).
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	Der WCST wird häufiger in der klinischen Neuropsychologie eingesetzt (Eling et al., 2008). Der Test dauert durchschnittlich 10 Minuten (Feldstein et al., 1999).
Durchführung	Im Test müssen die Teilnehmenden Karten nach wechselnden Regeln (wie Farbe, Form oder Anzahl) sortieren, ohne die Regel direkt zu kennen. Sie erhalten Feedback, das ihnen hilft, die Regel durch Versuch und Irrtum zu erkennen. Sobald sie die Regel gefunden haben, wird sie ohne Vorwarnung geändert, um ihre Fähigkeit zur Anpassung an neue Regeln zu prüfen. (Barceló, 2001) Miles et al. (2021) haben eine Checkliste erstellt, welche Empfehlungen für die Verwendung und Berichterstattung des WCST bietet.
Mögliche Fehlerquellen	Wiederholtes Testen kann zu verfälschten Ergebnissen führen, da die Teilnehmer mit der Zeit Strategien entwickeln können, ohne dass sich ihre exekutive Funktion verbessert.
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	Einführungspakete des WCST sind im Internet für rund 700 € erhältlich. Dabei sind neben dem Handbuch Kartendecks und Aufzeichnungshefte enthalten. (Grant/Berg, 2024)

Übertragbarkeit & Kombinations-möglichkeiten	Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen, dass die Kombination von gezielten Aufgabenvarianten mit fortschrittlichen Bildgebungstechniken die Analyse der kognitiven und neuronalen Grundlagen des WCST erheblich verbessern kann (Nyhus/Barceló, 2009).
Beispiel-visualisierung	 **Abbildung 14: Schematische Darstellung einer Serie des Wisconsin Card Sorting Tests (Barceló, 2001)**

Stroop-Test (Psyche – Indirekte Messung Gehirnaktivitäten)	
Definition der Methode	Der Stroop-Test ist ein kognitiver Test zur Untersuchung der selektiven Aufmerksamkeit und der Fähigkeit zur kognitiven Kontrolle. Der Test verdeutlicht die Fähigkeit des Gehirns, irrelevante Informationen zu ignorieren und auf relevante Reize zu reagieren. (Bauknecht, 2024)
Anwendung im urbanen Kontext	Schlittmeier et al. (2015) untersuchen in ihrer Studie die Auswirkungen von Straßenverkehrslärm auf die kognitive Leistungsfähigkeit und zeigen, unter anderem durch Einsatz eines Stroop-Tests, dass bei moderatem Verkehrslärm bessere Leistungen erzielt wurden als bei lautem.
Tools	Stroop-Tests werden meist mithilfe von digitalen Geräten durchgeführt. Der Test besteht normalerweise aus Farb-Wort-Stimuli. Diese bestehen aus Wörtern, die Farben benennen (z. B. „Rot“, „Blau“, „Grün“), aber in inkongruenten Farben geschrieben sind (z. B. das Wort „Rot“ wird in grüner Farbe dargestellt) (Bauknecht, 2024).
Daten/Datenschutz	Die Zeit, die eine Person benötigt, um auf einen Stimulus zu reagieren, wird erfasst. Dies ist die zentrale Messgröße des Tests und wird in Millisekunden angegeben.
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	Meistens werden Stroop-Tests an Computern durchgeführt. Der Test beinhaltet mehrere Durchgänge.

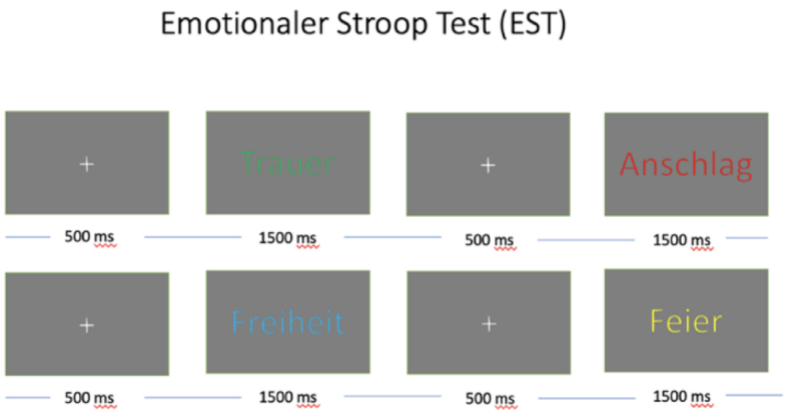
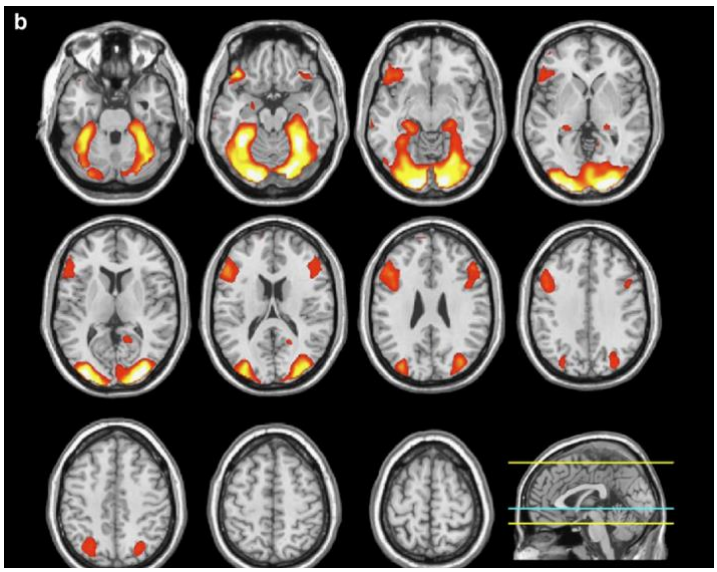
Durchführung	Die Durchführung wird anhand des Beispiels eines emotionalen Stroop-Tests erläutert. Dieser besteht aus 4 Durchgängen, in denen jeweils 144 Wörter präsentiert werden. Jedes Wort wird für 1500 Millisekunden (1,5 Sekunden) gezeigt, gefolgt von einem Fixationskreuz für 500 Millisekunden. Zwischen den einzelnen Durchgängen gibt es Pausen von maximal 60 Sekunden. Zudem können die Probanden nach jedem Testdurchgang eine kurze Pause von maximal 60 Sekunden einlegen. (Bauknecht, 2024) Anschließend werden die Daten ausgewertet.
Mögliche Fehlerquellen	Durch das Fehlen standardisierter Wortstimuli werden Vergleiche zwischen unterschiedlichen Studien sowie selbst zwischen den Probanden eines Tests erschwert (Price et al., 2012). Außerdem ist die Messvalidität durch die methodische Heterogenität der Aufgabenvarianten beeinträchtigt (Viviani et al., 2023).
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	Im Internet werden kostenlose Stroop-Tests angeboten. Genauso sind aber auch Komplettpakete des Farbe-Wort-Interferenztests, inkl. Material und Handanweisung, für rund 180 € zu erwerben (Bäumler, 1985).
Übertragbarkeit & Kombinations-möglichkeiten	Der Stroop-Test, ursprünglich entwickelt, um die Interferenz zwischen Wortbedeutung und Farbbenennung zu untersuchen, lässt sich auf eine Vielzahl von psychologischen und klinischen Anwendungen übertragen. Es gibt zahlreiche Kombinationsmöglichkeiten des Stroop-Tests, die dessen Anwendungsbereich erweitern können. Eine Kombination könnte darin bestehen, den klassischen Stroop-Test mit einer emotionalen Komponente zu verbinden, indem man emotionale Wörter oder Bilder einsetzt, um emotionale Reaktionen in verschiedenen Störungsbildern wie Depression oder Angst zu untersuchen. Banaei et al. (2017) kombinieren den Stroop-Test mit EEG und VR, um die Auswirkungen unterschiedlicher architektonischer Formen zu untersuchen. Auch eine Kombination mit TMS kann hilfreiche Ergebnisse bieten (Dengler et al., 2024).
Beispiel-visualisierung	

Abbildung 15: Beispiel einer exemplarischen Präsentation der Wörter in einem EST (Bauknecht, 2024)

Direkte Messungen

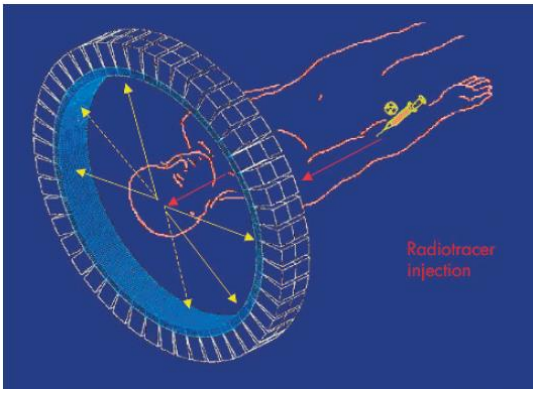
Im Gegensatz zu indirekten Messmethoden, die auf Verhaltensdaten basieren, messen direkte Methoden die neuronale Aktivität des Gehirns. Dies kann über die elektrische oder magnetische Aktivität von Neuronen direkt oder über Proxyparameter wie den Blutfluss oder die Sauerstoffsättigung, die als Indikatoren für neuronale Aktivität dienen, geschehen. So lassen sich durch die Aktivität in bestimmten Hirnarealen Rückschlüsse auf kognitive Prozesse und Reaktionen ziehen.

(Funktionelle) Magnetresonanztomografie (Psyche – Direkte Messung Gehirnaktivitäten)	
Definition der Methode	Funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT) (eng. Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) ist ein medizinisches Bildgebungsverfahren, das starke Magnetfelder und Radiowellen nutzt, um detaillierte Bilder insbesondere von weichen Geweben wie dem Gehirn zu erstellen. fMRI ist eine spezielle Art der Magnetresonanztomografie (MRT/MRI), die die Gehirnaktivität misst, indem sie Veränderungen im Blutfluss erkennt.
Anwendung im urbanen Kontext	MRT wird in der Umweltpsychologie eingesetzt. Studien, wie die von Kim et al. (2010) bieten Anzeichen dafür, dass urbane Umgebungen emotional belastend sein können. Vartanian et al. (2013) identifizieren in ihrer Studie, wie sich systematische Variationen der Kontur (am Beispiel von gekrümmten oder geradlinigen Räumen) auf ästhetische Urteile auswirken, und erkennen, dass Anmut und Schönheit eines visuellen Stimulus Aktivität im selben Netzwerk auslösen.
Tools	Zur Durchführung der Messung wird ein MRT-Gerät, z. B. das 3 Tesla Magnetom Trio MRI mit gradient Echo Planar Imaging Sequenzen benötigt.
Daten/Datenschutz	MRT erhebt BOLD-Signale (eng. Blood-Oxygenation-Level-Dependant) (Yousem, 2014).
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	Die Durchführung erfolgt im Krankenhaus oder Forschungszentrum. Außerdem gibt es mobile MEG-Technologien (eng. Portable MEG) (Discover, 2019). Die Untersuchungsmethode ist mit einem signifikanten Zeitaufwand verbunden (Yousem, 2014).
Durchführung	Dem Probanden werden verschiedene Stimuli präsentiert und die folgende Aktivierung der Hirnareale wird mittels fMRT gemessen (Kim et al., 2010).
Mögliche Fehlerquellen	fMRT misst lediglich die relative Veränderung der Neuralaktivität. Einschränkungen können durch die Laborumgebung und Art, wie die Bilder präsentiert werden, sowie individuell unterschiedliche Wahrnehmungen der Probanden entstehen. (Kim et al., 2010)
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	Ein MRI-Gerät kostet ca. 2–3 Mio. USD bei jährlichen Wartungskosten von 150–200 Tsd. USD (Yousem, 2014). Die Kosten pro Scan liegen bei ca. 400 USD (Guo, 2012).

Übertragbarkeit & Kombinations-möglichkeiten	Grundsätzlich ist es möglich, simulierte Umgebungen (VR) als Stimuli zu nutzen. Allerdings ist MRT als Methode verhältnismäßig teuer. Eine Kombination mit anderen physiologischen Markern wie Herzfrequenz, Blutdruck und Cortisolspiegel ist möglich (Kennedy/Adolphs, 2011). Weiterhin kann fMRI mit EEG ergänzt werden (EEG-Informed fMRI genannt). Hierdurch werden die Stärken beider Methoden kombiniert: EEG ermöglich eine hohe zeitliche, fMRI eine hohe räumliche Auflösung) (Abreu et al., 2018). In einer anderen Studie werden MR kompatible VR-Geräte zur Impulsgebung genutzt (Reggente et al., 2018). fMRT kann auch mit MEG kombiniert werden (Nonnenmacher, 2024).
Beispiel-visualisierung	 **Abbildung 16: Beispielhafte Darstellung von aktivierten Hirnarealen (Kim et al., 2010)**

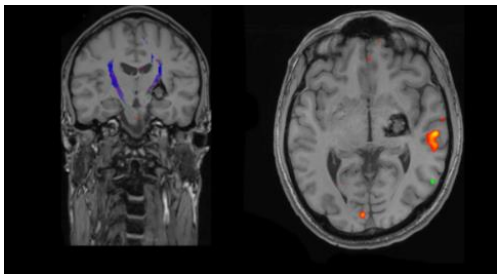
Positronen-Emissions-Tomografie (Psyche – Direkte Messung Gehirnaktivitäten)	
Definition der Methode	Positronen-Emissions-Tomografie (engl. Positron Emission Tomography (PET)) ermöglicht die Untersuchung biologischer Funktionen im Körper und unterscheidet sich damit von der Magnetresonanztomografie (MRT/MRI) und Computertomografie (CT), die sich auf morphologische Veränderungen im Körper fokussieren. (Lameka et al., 2016) Bei PET wird ein leicht radioaktiver Stoff (Tracer) injiziert, der nach Durchlaufen von metabolischen Prozessen im Gehirn Strahlung emittiert, die mithilfe eines PET-Scanners beobachtet werden kann. (Tay/Piccini, 2004) (Shukla/Kumar, 2006) Je nach Intensität, können Aussagen über den biologischen Zustand des Probanden gemacht werden. (Shukla/Kumar, 2006)
Anwendung im urbanen Kontext	Es konnten keine Anwendungsbeispiele im urbanen Kontext identifiziert werden, da PET traditionell in restriktiven Körperpositionen durchgeführt wird. Weiterentwicklungen der Technik stellen jedoch erste Prototypen von Helm-PET vor, durch

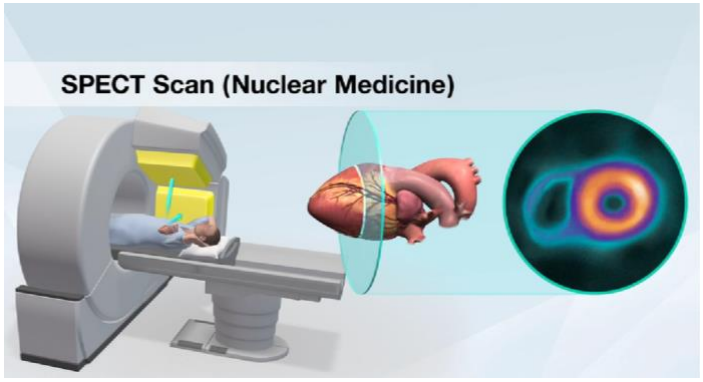
	welche zukünftig auch Forschungen mit tragbaren PET möglich würden (Bauer et al., 2016).
Tools	Je nach Untersuchungsziel wird ein passender Tracer eingesetzt. Zur Messung der Hirndurchblutung wird beispielsweise H215O verwendet. Tracer sind leicht radioaktive Stoffe mit kurzer Halbwertszeit (wenige Minuten bis zwei Stunden), was das Risiko für die Patienten verringert. Außerdem wird ein PET-Scanner mit Szintillationsdetektoren zum Beispiel aus Bismut-Germanat benötigt. (Tay/Piccini, 2004)
Daten/Datenschutz	Durch PET kann die Störung bestimmter Neurotransmitter- und Rezeptorsysteme, des Blutflusses, des Sauerstoffstoffwechsels und der Aminosäuren-Aufnahme festgestellt werden. Durch PET können neurologische Krankheiten wie Demenz oder Tumoren frühzeitig erkannt werden. (Herholz/Heiss, 2004)
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	PET wird in Kliniken oder in einem Forschungszentrum durchgeführt. Die Aufnahme und Verteilung des Tracers im Körper können bis zu 60 Minuten pro Patient dauern. Der PET-Scan dauert ca. eine halbe Stunde. (Cleveland Clinic, 2022)
Durchführung	Als Erstes wird der Tracer (d.h. ein vom Körper gebrauchter Stoff mit einem Positron emittierenden Zusatz) in die Blutlaufbahn des Patienten injiziert. Der Tracer wird vom Körper an die Stelle transportiert, wo der Stoff am meisten gebraucht wird (zum Beispiel nehmen Tumoren mehr Glukose auf als üblich. Der Transport des Tracers würde im Körper an die entsprechende Stelle, an dem sich der Tumor befindet, erfolgen). Die am Aufenthaltsort des Tracers durch das emittierte Positron ausgestrahlte Gammastrahlung kann anschließend vom PET-Scanner registriert werden. (Shukla/Kumar, 2006)
Mögliche Fehlerquellen	PET unterliegt der Gefahr einiger diagnostischer Limitationen. Als Beispiel dafür führen Vaquero/Kinahan (2015) die quantitative Genauigkeit der Messungen an.
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	PET-Scanner kosten 22.5000-29.5000 USD (Block Imaging, 2024). Ein Scan kostet ab 1.200 USD und hängt von der zu untersuchenden Stelle im Körper ab (Kancherlapalli, 2023).
Übertragbarkeit & Kombinations-möglichkeiten	PET wird hauptsächlich zur Untersuchung biologischer Veränderungen im Gehirn oder Körper eingesetzt (Lameka et al., 2016). Zwar ist dies nicht direkt mit städtischen oder urbanen Lebensbedingungen verbunden, jedoch könnten gesundheitliche Auswirkungen im Zusammenhang mit verschiedenen Lebensumgebungen erforscht werden.

Beispiel-visualisierung	 **Abbildung 17: Schema der Injektion, Photonenemission und des PET-Scan-Vorgangs (Tay/Piccini, 2004)** **Abbildung 18: Prototypenkonzept eines ambulanten Helm-PET (Bauer et al., 2016)**

Diffusions-Tensor-Bildgebung (Psyche – Direkte Messung Gehirnaktivitäten)	
Definition der Methode	Die Diffusions-Tensor-Bildgebung (eng. Diffusion Tensor Imaging (DTI)) ist eine Weiterentwicklung der Magnetresonanztomografie (MRT), häufig auch als Kernspintomografie bezeichnet. DTI beruht auf modifizierten MRT-Techniken, die eine Sensibilität für mikroskopische, dreidimensionale Wasserbewegungen im Gewebe ermöglichen. Während die konventionelle MRT Informationen über das Volumen und die Makrostruktur der grauen und weißen Substanz liefern kann, gibt DTI einen Hinweis auf die Mikrostruktur der weißen Substanz. Diese mikrostrukturellen Informationen geben Aufschluss über die Integrität der axonalen Fasern, die Kohärenz, mit der sie gebündelt sind, und damit über ihre Fähigkeit, als effiziente Leitungsbahnen für neuronale Informationen zu funktionieren. Die Messung der Diffusion bietet wichtige Einblicke in die Konnektivität des Gehirns. (Cascio et al., 2007)
Anwendung im urbanen Kontext	Es konnten keine Anwendungsbeispiele im urbanen Kontext identifiziert werden.
Tools	DTI erfordert DTI-fähiges MRT-Gerät.

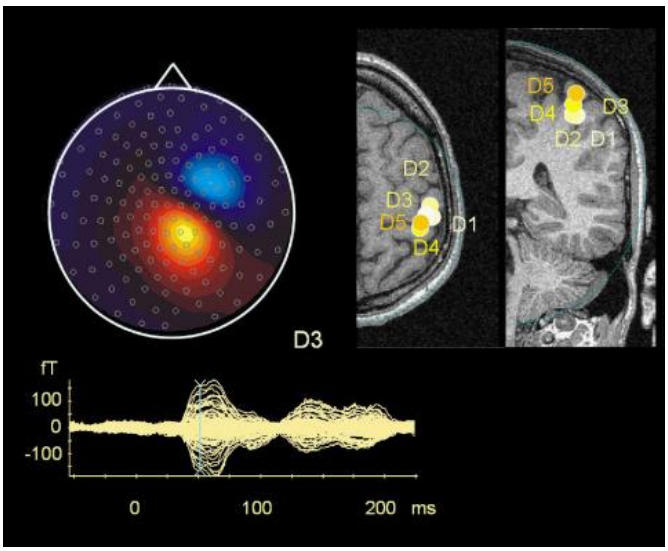
Daten/Datenschutz	DTI macht Aufnahmen vom Gehirn, vergleichbar mit einem MRT. Dabei liegt der Fokus auf den weißen Substanzen, die durch ein DTI besser hervorgehoben werden als bei einem MRT. So können besonders gut Daten zur Gehirnentwicklung gesammelt werden (Mori/Zhang, 2006).
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	Die Messung wird in einem Labor durchgeführt, vgl. MRT Vergleichbar mit einem MRT, ca. 20 Minuten pro Person
Durchführung	Während der DTI-Untersuchung wird das Gehirn in einem Ma-gnetresonanztomograph untersucht. Dazu liegt der Patient auf einer Liege und sein Kopf befindet sich in einer Radiofrequenzspule. Es ist möglich, während der Studie zusätzliche Reize (z. B. Texte, Bilder, Töne) zu präsentieren. Dies ist auch durch VR-Brillen möglich. Antworten des Patienten können über eine Tastatur erfasst werden. (Universität Zürich, 2024)
Mögliche Fehlerquellen	Mori und Zhang (2006) beschreiben ausführlich die neurobiologischen Einschränkungen im Zusammenhang mit der Auswertung von DTI. Wie andere bildgebende Verfahren der Neurologie ist auch die DTI dadurch eingeschränkt, dass sie von der Fähigkeit der Versuchsperson abhängt, sich im Scanner nicht zu bewegen. Bei klinischen Studien kann dieses Problem manchmal durch Sedierung umgangen werden, aber oft bleibt es eine Herausforderung, Bilder frei von Bewegungsartefakten zu erhalten.
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	Gemäß den Angaben von Anbietern, z. B. Kliniken, belaufen sich die Kosten pro Durchführung bei Selbstzahlern auf rund 350 € pro Person.
Übertragbarkeit & Kombinationsmöglichkeiten	DTI ist nicht mobil durchführbar. Aufgrund des starken Magnetfeldes ist die Nutzung anderer Geräte nicht oder nur eingeschränkt möglich. Eine Übertragbarkeit ist deshalb schwierig. Die Methode steht im Zusammenhang mit MRT. Auch der Einsatz von VR-Brillen ist möglich (Universität Zürich, 2024).
Beispiel-visualisierung	 **Abbildung 19: Kernspintomograf (Universitätsklinikum Heidelberg, 2024)**

	 **Abbildung 20: Beispielbild eines DTI-Ergebnisses (Universitätsklinikum Heidelberg, 2024)**
Einzelfotonen-Emissions-Computertomografie (Psyche – Direkte Messung Gehirnaktivitäten)	
Definition der Methode	Einzelfotonen-Emissions-Computertomografie (eng. Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)) wertet von einem Tracer ausgesandte Gammastrahlen mithilfe von Fotodioden oder einem Fotovervielfacher-Array (Gammakamera) aus. Das daraus entstandene Bild liefert im Gegensatz zu einem CT oder MRT auch funktionelle Informationen, wie z. B. die Durchblutung oder Stoffwechselprodukte. (Dorbala et al., 2018)
Anwendung im urbanen Kontext	Es konnten keine Anwendungsbeispiele im urbanen Kontext identifiziert werden.
Tools	Es wird ein SPECT-Gerät benötigt, welches den eingesetzten Tracer gut erkennen kann. Die Tracer müssen abhängig von der zu untersuchenden Region ausgewählt werden (Dorbala et al., 2018).
Daten/Datenschutz	Die entstandenen Bilder werden zur Erkennung diverser Krebserkrankungen, der Durchblutung des Herzens, Funktion der Schilddrüse etc. genutzt. Die funktionelle Bildgebung erweitert das Spektrum der Untersuchung deutlich.
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	SPECT kann in Labors oder Krankenhäusern mit nuklearmedizinischer Abteilung durchgeführt werden. Die Zeit im SPECT-Gerät dauert je nach Untersuchung zwischen 10–40 Minuten. Mit Vorbereitungszeit (Wartezeit nach der Injektion des Tracers) dauert die Untersuchung für einen Patienten rund 2 Stunden. (Universitätsspital Bern, 2024)
Durchführung	Vor der SPECT-Untersuchung wird eine radioaktiv markierte Substanz in eine Armvene gespritzt, die sich je nach Art des Stoffes in unterschiedliche Organe verteilt und dort Gammastrahlen abgibt. Nachdem eine ausreichende Verteilung im Körper erreicht wurde, kann mit der SPECT-Untersuchung begonnen werden. Bei der SPECT bewegt sich der Detektorkopf der Gammakamera um die Patientin oder den Patienten. Diese Technik erlaubt eine räumliche Darstellung der Aktivitätsverteilung im Körper. Solche Untersuchungen verlangen von der zu untersuchenden

	Person, über längere Zeit ruhig zu sitzen oder zu liegen. (Lengauer, 2023)
Mögliche Fehlerquellen	Die entstandenen Bilder lassen, wie andere bildgebende Verfahren auch, einen gewissen Interpretationsspielraum offen.
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	Die Kosten pro Scanner-Stunde belaufen sich auf 150 €, die Kosten beziehen sich dabei ausschließlich auf die Zeit im Scanner (Medizinische Hochschule Hannover, 2024).
Übertragbarkeit & Kombinations-möglichkeiten	Nuklearmedizin birgt Gefahren für die Testperson, außerdem sind die Einsatzmöglichkeiten außerhalb der Medizin gering. Kombiniert mit einem CT und einem MRT können die entstandenen Daten für eine umfangreiche Diagnostik verwendet werden (Khalil et al., 2011). SPECT kann auch mit MEG kombiniert werden (Nonnenmacher, 2024).
Beispiel-visualisierung	 **Abbildung 21: SPECT Scan (Medmovie, 2024)**

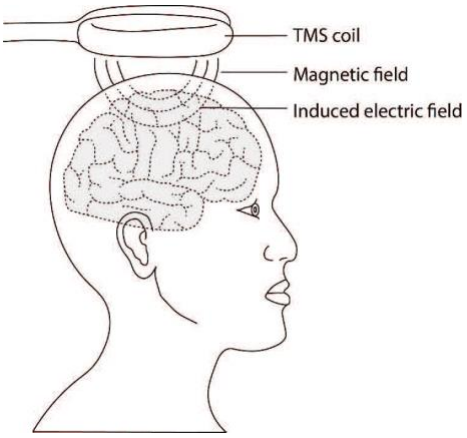
Magnetoenzephalografie (Psyche – Direkte Messung Gehirnaktivitäten)	
Definition der Methode	Die Magnetoenzephalografie (MEG) stellt ein nicht-invasives Verfahren zur Messung der elektromagnetischen Aktivität des Gehirns dar. Die Bestimmung der Magnetfeldverteilung über der Kopfoberfläche erfolgt mittels Multikanalableitungen mit einer zeitlichen Auflösung von unter einer Millisekunde. Das Verfahren ermöglicht die Darstellung und Lokalisation kortikaler Hirnfunktionen. MEG ermöglicht die Ableitung von Antworten des Gehirns auf innere und äußere Ereignisse (ereigniskorrelierte Magnetfelder) sowie von zustandsabhängigen oszillatorischen Aktivitäten (spontane Magnetfelder). Letztere können zur Darstellung von Hirnregionen, die an der Steuerung von Bewegungen beteiligt sind, eingesetzt werden. (Braun, 2007)
Anwendung im urbanen Kontext	Es konnten keine Anwendungsbeispiele im urbanen Kontext identifiziert werden. Allerdings werden mit voranschreitender Technik auch MEG-Scanner entwickelt, die wie ein Helm übergestülpt werden können, um so in Zukunft zur Erforschung der

	Gehirnabläufe während alltäglicher Bewegungen eingesetzt werden können (Mocker, 2018).
Tools	Zur Messung der Magnetfelder müssen wegen der äußerst geringen Stärke (ca. ein Milliardstel des Erdmagnetfeldes) spezielle Sensoren eingesetzt werden. Zur Messung der Magnetfelder des Gehirns werden sogenannte SQUIDs (eng. super conducting quantum interference devices) verwendet. Die supraleitenden SQUIDs befinden sich entfernt vom Kopf im mittleren Teil eines Thermosgefäßes (Dewars), das mit flüssigem Helium gefüllt ist und eine Temperatur von −270 °C aufweist. Die Magnetfelder des Gehirns werden mit supraleitenden Aufnahmespulen, die in der Nähe des Kopfes innerhalb des Dewars liegen, erfasst und in die SQUIDs zur Magnetfeldmessung eingekoppelt. (Braun, 2007)
Daten/Datenschutz	Die an bis zu 300 Sensoren abgeleitete Stärke der Magnetfelder liegt in der Größenordnung von wenigen Femtotesla (10^{-15} T) bis einigen Pikotesla (10^{-12} T). Es werden Bilder des Gehirns erzeugt, mit deren Hilfe untypische Hirnaktivitäten erkannt werden können. Dies wird zumeist für die Auffindung von Tumoren oder von epileptischen Zentren genutzt. (Braun, 2007; Hinrichs, 2012)
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	MEG wird bislang primär in einem Labor durchgeführt. Zukünftig sind auch mobile MEG-Scanner denkbar, welche sich bislang jedoch noch in der Entwicklung befinden (Schofield et al., 2024). Die eigentliche MEG-Messung dauert ca. 60 Minuten und ist in mehrere Blöcke unterteilt (Universität Oldenburg, 2024).
Durchführung	Vor dem MEG muss das Gehirn abgemessen werden. Dazu wird zuvor ein MRT durchgeführt. Anschließend wird das eigentliche MEG zur Erstellung der Bilder des Gehirns genutzt. (Nonnenmacher, 2024)
Mögliche Fehlerquellen	Durch die sehr geringen Messgrößen können MEG-Messungen bereits durch kleine Einflüsse beeinflusst werden. So können beispielsweise metallhaltige Farbpigmente aus einem Tattoo das Ergebnis verfälschen (Braun, 2007).
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	Das Herunterkühlen der supraleitenden SQUIDs auf –270° C durch flüssiges Helium ist der größte Kostenpunkt bei einem MEG. Die Betriebskosten werden deshalb mit „einigen zehntausend Euro pro Jahr“ beschrieben. (Hinrichs, 2012)
Übertragbarkeit & Kombinations-möglichkeiten	Das MEG wird am besten mit einem fMRT kombiniert. Auch eine Kombination mit einem PET, SPECT oder NIRS kann hilfreich sein (Nonnenmacher, 2024). Durch die sehr spezifische Anwendung und hohen Betriebskosten ist eine Anwendung im urbanen Bereich bislang nicht ratsam.

Beispiel-visualisierung	 **Abbildung 22: Taktile Stimulation des Mittelfingers der linken Hand löst eine charakteristische Antwort des Gehirns aus (Braun, 2007)**

Transkranielle Magnet- und Gleichstromstimulation (Psyche – Direkte Messung Gehirnaktivitäten)	
Definition der Methode	Transkranielle Magnet- und Gleichstromstimulation (TMS) ist eine nicht-invasive Methode der kortikalen Stimulation, mithilfe derer man motorisch evozierte Potenziale bzw. die kognitive Kontrolle messen kann (Lefaucheur, 2019; Dengler et al., 2024). Die Stimulation erfolgt mithilfe von lokalen Magnetfeldern, die den Blutfluss in Gehirnarealen und damit die dortige Aktivität beeinflussen (Strafella/Paus, 2001; UNC School of Medicine, 2024).
Anwendung im urbanen Kontext	Es konnten keine Anwendungsbeispiele im urbanen Zusammenhang identifiziert werden. TMS wird bisher zu wissenschaftlichen und klinischen Zwecken (z. B. zur Behandlung von Depressionen) eingesetzt (Mayo Clinic, 2023).
Tools	TMS beeinflusst den regionalen zerebralen Blutfluss, der durch eine fMRI-Messung sichtbar gemacht werden kann (Strafella/Paus, 2001). Für die Messung des fMRI im Ruhezustand (vor der Stimulation) ist ein 3-T-Prisma-Scanner notwendig (Dengler et al., 2024). Für die Messung des TMS wird eine Magnetspule benötigt, die mithilfe von Strom ein Magnetfeld erzeugt, welches bis zu 3 cm tief in das Gehirn reicht (UNC School of Medicine, 2024).
Daten/Datenschutz	Es werden Daten zum kognitiven Umschalten, Arbeitsgedächtnis und der Inhibitionsleistung erhoben (Dengler et al., 2024). Es

	handelt sich dabei um Maße für kognitive Kontrolle und damit die Voraussetzung für zielorientiertes alltägliches Handeln.
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	TMS wird im Krankenhaus oder Forschungszentrum durchgeführt. Es sind keine Vor- oder Nachbereitungsprozeduren notwendig. Dengler et al. (2024) beschreiben, eine MRI-Messung und drei TMS-Sitzungen im Abstand von rund 10 Tagen durchgeführt zu haben.
Durchführung	In der ersten Sitzung wird der fMRI im Ruhezustand als Vergleichsbasis ermittelt. In den nachfolgenden Sitzungen müssen die Teilnehmenden ausgewählte Aufgaben einmal vor der TMS und einmal nach der TMS lösen. Die TMS wird auf die zu untersuchenden Gehirnareale angewandt: Die negative Kontrollstelle (cranial vertex), die aktive Kontrollstelle (dorsal attention network) und die primäre Untersuchungsstelle. Dabei wird die Veränderung der Leistung durch die TMS untersucht.
Mögliche Fehlerquellen	Das Vorhandensein extrinsischer und intrinsischer Belohnungen kann kognitives Kontrollverhalten beeinflussen. Auch die Auswahl der Gehirnareale, auf die die Magnetspulen ausgerichtet sind, kann ebenfalls einen Einfluss auf die Ergebnisse haben. (Dengler et al., 2024)
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	Im Therapie-Sektor kostet eine etwa 20-minütige TMS-Behandlung 300–500 USD (Axis Integrated Mental Health, 2024). Ein MRI-Scan kostet etwa 350–1.200 € (ANOVA Institute for Regenerative Medicine, 2024).
Übertragbarkeit & Kombinations-möglichkeiten	TMS kann Einblicke in die Gehirnaktivität beim Erledigen alltäglicher Handlungen geben, die auch auf die Stadt übertragbar sind. Autofahren erfordert beispielsweise eine Planungsleistung (Ziel-ort), Gedächtnisleistung (Route), Überwachungsleistung (Fahrgeschwindigkeit), Umschaltungsleistung (zwischen Straße und Navigationsgerät) und Inhibitionsleistung (Ablenkungen ausfiltern). (Dengler et al., 2024) Auch bei anderen innerstädtischen Aktivitäten könnten diese Gehirnleistungen erforderlich sein und untersucht werden. Zur Visualisierung der Effekte von TMS kann es mit fMRI kombiniert werden. Um kognitive Umschaltung zu testen, können Navon-Aufgaben eingesetzt werden. Für die Untersuchung des Arbeitsgedächtnisses ist ein Stroop-Test sinnvoll und für die Inhibitionsleistung kann ein N-back-Test verwendet werden. (Dengler et al., 2024)

Beispiel-visualisierung	 **Abbildung 23: Schematische Darstellung des Magnetfeldes, erzeugt durch die TMS-Spule (Barroso et al., 2019)**

Mobile Elektroenzephalografie (Psyche – Direkte Messung Gehirnaktivitäten)	
Definition der Methode	Eine mobile Elektroenzephalografie (mEEG) ist ein tragbares Gerät, das die elektrische Aktivität des Gehirns aufzeichnet. Es ermöglicht die Überwachung und Analyse von Hirnströmen in alltäglichen Umgebungen, außerhalb eines Labors oder Krankenhauses, und wird oft in der Forschung, Diagnostik oder Therapie eingesetzt.
Anwendung im urbanen Kontext	Die Methode wird bereits im urbanen Kontext genutzt. Beispielsweise zur Untersuchung der psychischen Interaktion zwischen Menschen und Umwelt, speziell der Effekt der gebauten Welt auf die Emotionen der Probanden (Mavros et al., 2016). Die Methode wird auch verwendet, um zu messen, wie die Auswirkungen von gestalteter Stadtlandschaft auf das Gehirn und den mentalen Zustand bewertet werden (Olszewska et al., 2014). Mavros et al., (2022) konnten nachweisen, dass grüne Orte zu stärkeren Alphawellen im vorderen Hirnbereich führen, was auf höhere Aufmerksamkeitswiederherstellung hinweist. Im Gegensatz dazu erhöhen urbane Umgebungen das Theta-/Betawellen-Verhältnis, was auf stärkere kognitive Belastungen hindeutet. Weiterhin konnten positivere Ergebnisse beim Gehen außerhalb von Gebäuden beob-achtet werden. Zhang et al. (2021) identifizieren den Anteil von Pflanzen und grünen Farben in städtischen Straßen als positiv für das Gefühl von Komfort und Vitalität und eine größere Farbvielfalt als einflussreich auf positive Emotionen. Banaei et al. (2017) resümieren in ihrem Literaturüberblick zum Einfluss von Formen im Innenraum auf die Dynamik des menschlichen Gehirns, dass die ästhetische Beurteilung visueller Reize mithilfe von mEEG analysiert werden kann. Kotradyova et al. (2019) identifizieren die positive Wirkung von Holzmaterial auf das Nervensystem mittels EEG. Während Angst und Furcht reduziert werden, sind das Gedächtnis und die Denkfähigkeit der Teilnehmenden verbessert worden. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen weitere Untersuchungen zu naturbelassenem Design (eng. biophilic). Demnach reduzieren natürliche Elemente Stress und Angst und

	verbessern physiologische und kognitive Leistung (Yin et al., 2019; Yin et al., 2020).
Tools	Zur Durchführung wird ein mobiles EEG-Gerät in Verbindung mit Software zur Echtzeitdatenverarbeitung und Synchronisation benötigt (Mavros et al., 2016). Als kostengünstige Varianten wird ein EEG-System mit bioPotenzial Messchip (TI ADS1299), Bluetooth-Modul, Elektroden und Mikrocontroller vorgeschlagen (Senevirathna et al., 2016). Grundsätzlich gibt es die Möglichkeit, die Geräte an verschiedenen Stellen des Körpers zu tragen: an der Taille und Rücken, vollständig an der Hüfte, am Kopf mit zusätzlicher Ausrüstung in einem Rucksack oder außerhalb des Körpers, am Kopf mit Funkübertragung, zu bspw. Smartphone oder Computer, am Kopf ohne zusätzliche Ausrüstung zu tragen (Bateson et al., 2017).
Daten/Datenschutz	Es werden emotionale Zustände erhoben, welche über die Auswertung von neuronalen Aktivitäten (EEG-Signale) erfasst werden (Mavros et al., 2016). Dazu dienen Alpha-Wellen und auditorische Reaktionen auf bspw. 2-Hz und 40-Hz-click-trains zur Identifizierung von neurodiversen Probanden (Senevirathna et al., 2016).
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	mEEG ist mobil am gewünschtem Einsatzort einsetzbar (Mavros et al., 2016). Die kostengünstige Lösung bedarf einer Vorbereitungszeit von 30 Minuten (inklusive Anbringen der Elektroden). Senevirathna et al., (2016) beschreiben in ihrer Studie, dass die Ergebnisse zusätzlich bis zu 5 Stunden lang vor der Langzeitmessung überprüft wurden.
Durchführung	Gemäß Mavros et al. (2016) läuft die Durchführung und Auswertung in folgenden Schritten ab: 1. Teilnehmende tragen ein mobiles EEG-Gerät (ggf. inkl. Rucksack). 2. EEG-Daten werden während des Gehens in verschiedenen urbanen und natürlichen Umgebungen aufgezeichnet. 3. Die EEG-Daten zwischen verschiedenen Umgebungen werden verglichen, um die psychologischen Effekte zu untersuchen.
Mögliche Fehlerquellen	EEG-Daten weisen eine begrenzte räumliche Auflösung auf, besonders bei der Untersuchung tieferer Hirnstrukturen. Außerdem können Artefakte und Störungen durch Bewegung und externe Umgebungsfaktoren auftreten. (Mavros et al., 2016) Das Ergebnis wird durch Bewegung und die Anzahl der Elektroden erheblich beeinflusst (Casson/Trimble, 2018).
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	Die kostengünstige Lösung mit dem Texas Instruments ADS1299, Elektroden und einem Mikrocontroller hat Materialkosten von unter 200 USD (Senevirathna et al., 2016). Professionelle Geräte kosten mehrere Tausend EUR.
Übertragbarkeit & Kombinations-möglichkeiten	mEEG wird bereits in verschiedenen urbanen Anwendungsfeldern eingesetzt und ist ein bedeutsames Tool in der Disziplin des urbanen Verhaltens. Die Technologie wurde bereits in nachgebauten Einzelhandelssituationen genutzt (Casson/Trimble, 2018). Die Anwendung auf Einkaufsstraßen sollte – sofern störungsarm –

möglich sein. Es empfiehlt sich ein Tag mit moderater Sonneneinstrahlung. Aufgrund der Beeinträchtigung durch die Bewegung des Probanden erscheint die Messung des Effektes der Impulse mit „Bewegungspausen“ sinnvoll, weiterhin ist eine „gute“ Kalibrierung des Systems notwendig.
EEGs werden bereits in Kombination mit Verhaltensexperimenten eingesetzt (Andreani/Sayegh, 2017). Auch Schnittstellen zu Videoaufzeichnung (Karandinou, 2018), GPS-Tracker, Hautleitfähigkeitssensoren (Mavros et al., 2016), Eyetracking und Gyroskop-Daten (Casson/Trimble, 2018) wurden dokumentiert. Andere Ansätze nutzten AR (Krugliak/Clarke, 2022; Zhang et al., 2021) oder VR (Vecchiato et al., 2015) in Kombination mit (mobilem) EEG. Banaei et al. (2017) kombinierten EEG mit einem Stroop-Test und VR Simulationen.

Beispiel-visualisierung

Abbildung 24: Beispiel eines Probanden während des mobilen EEG-Experiments (Mavros et al., 2016)

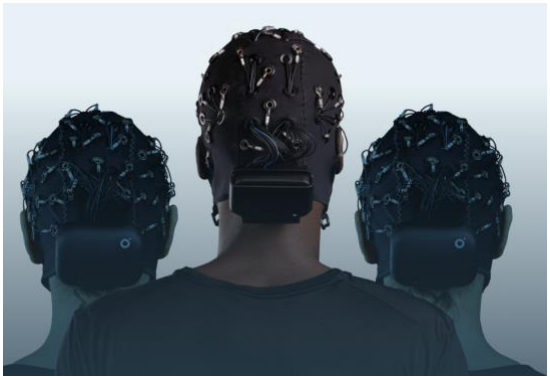
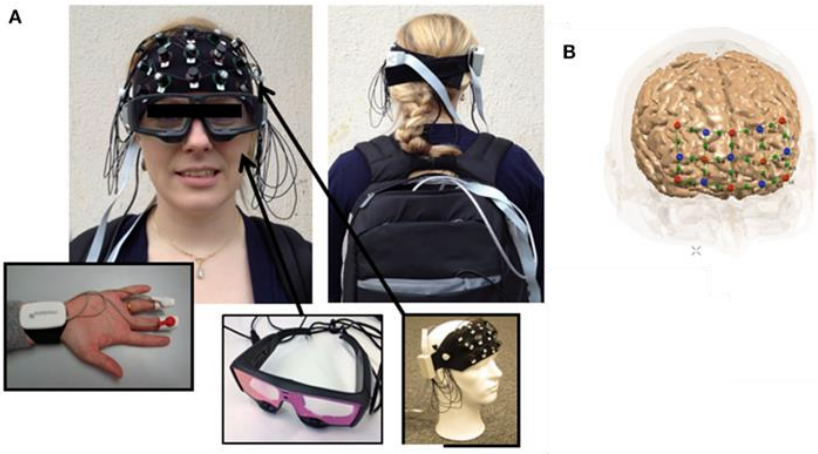


Abbildung 25: Beispiel mobiler EEG-Geräte (Mbt, 2024)

(Funktionelle) Nahinfrarotspektroskopie (Psyche – Direkte Messung Gehirnaktivitäten)	
Definition der Methode	(Funktionelle) Nahinfrarotspektroskopie (eng. (functional) near-infrared spectroscopy (fNIRS/NIRS)) ist ein nicht-invasives bildgebendes Verfahren. Mit dieser Methode wird die Gehirnaktivität gemessen, indem mit Infrarotlicht die Sauerstoffsättigung des Blutes im Gehirn erfasst wird (meist im präfrontalen Kortex, welcher für kognitive und emotionale Funktionen zuständig ist). NIRS ermöglicht die Beobachtung von Hirnaktivität bei kognitiven und motorischen Aufgaben durch die Messung der Lichtabsorption, die vom Sauerstoffgehalt des Blutes abhängt. (Dorsch, 2024).

Anwendung im urbanen Kontext	fNIRS könnte eine effektive Methode zur Untersuchung von Entscheidungen im urbanen Kontext sein (Kopton/Kenning, 2014). Studien wurden jedoch meist im Labor mit Video- oder Bilddarstellungen durchgeführt. „Angenehme“ fußgängerfreundliche Stadtszenen haben eine entspannende Wirkung (Brunner et al., 2023). Grüne städtische Räume beruhigen das Gehirn, städtische Kerngebiete lösen Stress und Angst aus (Olszewska-Guizzo et al., 2021). Auch in der Einzelhandels- bzw. Produktforschung wird NIRS eingesetzt. So konnten für bestimmten Produktlabels (bspw. Bio) und Markenprodukte eine erhöhte Hirnaktivität festgestellt werden (Meyerding/Mehlhose, 2020).
Tools	Für die Methode werden mobile Mehrkanal-fNIRS-Geräte (Kopton/Kenning, 2014) bspw. NIRS SPORT-Geräte von NIRx (Olszewska-Guizzo et al., 2021) benötigt.
Daten/Datenschutz	Gemessen werden bei fNIRS/NIRS die Oxy- und Deoxy-Hämoglobin-Konzentrationen im präfrontalen Kortex (Kopton/Kenning, 2014).
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	Eine Durchführung kann mobil am gewünschten Ort (Kopton/Kenning, 2014) oder in einem Labor stattfinden. Die Geräte können wesentlich schneller als EEG-Geräte angebracht werden (Kopton/Kenning, 2014). Die Messung dauert je nach Anwendungsfall ca. 20 Minuten (Meyerding/Mehlhose, 2020).
Durchführung	Gemäß Meyerding et al. (2018) läuft die Messung in folgenden Schritten ab: - fNIRS-Haube wird platziert - Geräte werden kalibriert - Stimuli werden präsentiert - Hirnaktivitäten werden gemessen - Daten werden verarbeitet
Mögliche Fehlerquellen	Bewegungsartefakte könnten das Signal beeinflussen, sind aber geringer als bei bspw. fMRI (Boyu et al., 2017; Kopton/Kenning, 2014). Auch eine Beeinflussung durch dicke Haare kann auftreten (Olszewska-Guizzo et al., 2021). Die Methode hat eine geringere räumliche Auflösung als fMRI. Tiefer liegende Gehirnregionen sind schwer zugänglich (Kopton/Kenning, 2014).
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	FNIRs ist günstiger als bspw. fMRI (Kopton/Kenning, 2014) und ist eine relativ einfache Methode (Boere et al., 2024).
Übertragbarkeit & Kombinations-möglichkeiten	Die Methode eignet sich hervorragend für den Einsatz in urbanen Umgebungen (Kopton/Kenning, 2014; Pinti, 2018). Die Nutzung von fNIRS wird als geeignet für die Untersuchung von Umgebungspräferenzen und Stressreduktion im urbanen Kontext beschrieben (Boyu et al., 2017). Eine Kombination mit Eyetracking, EDA (Elektrodermale Aktivität) (Kopton/Kenning, 2014) und MEG ist möglich (Nonnenmacher, 2024).

Beispiel-visualisierung	 **Abbildung 26: Möglicher Aufbau eines Feldversuches mit fNIRS (Kopton/Kenning, 2014)**

4.5 Methoden zur Vermessung des Körpers (Physiologie)

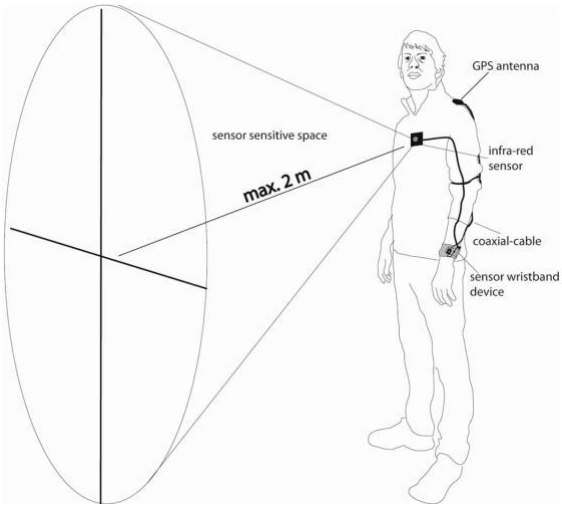
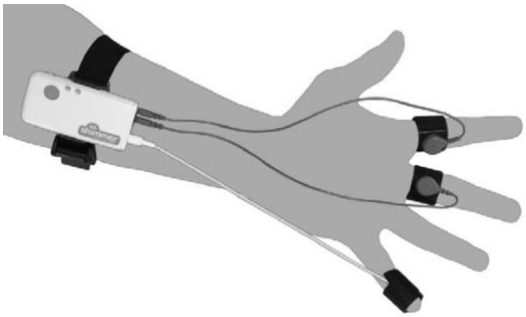
Körper und Geist des Menschen beeinflussen sich gegenseitig. Nachdem zuvor die neurologischen Messmethoden zum besseren Verstehen der Psyche vorgestellt wurden, geht es im nachfolgenden Unterkapitel um die Physiologie. Denn nach der Embodiment-Theorie sitzt der Geist nicht nur im Gehirn, sondern im gesamten Körper, weshalb es ebenso relevant ist, physiologische Zustände zu untersuchen, um kognitive Prozesse zu verstehen. Die Methoden sind nach Verfahren zur Erfassung von Reaktionen auf der Haut, im Herz-Kreislauf-System und in den Muskeln unterteilt.

4.5.1 Methoden zur Vermessung der Haut

Die Haut ist das größte Organ des Menschen. Sie spielt eine zentrale Rolle in der Physiologie, indem sie eine Vielzahl von Funktionen übernimmt, angefangen bei dem Schutz des Körpers über die Thermoregulation bis hin zu ihrem Beitrag innerhalb des Immunsystems. Da sie vielfältige Aufgaben des menschlichen Körpers übernimmt, ist der Einsatz von Hautleitfähigkeitssensoren in der Forschung etabliert.

Hautleitfähigkeitssensoren (Körper (Physiologie) – Haut)	
Definition der Methode	Die Messung der Hautleitfähigkeit über EDA (Elektrodermale Aktivität; engl. GSR, Galvanic skin response) wird verwendet, um emotionale Reaktionen und psychophysiologische Zustände wie Stress, Erregung und Aufmerksamkeit zu messen. EDA basiert auf der Aktivität der ekkrinen Schweißdrüsen, deren Funktion durch das sympathische Nervensystem gesteuert wird. Diese Drüsen reagieren unbewusst auf äußere Reize und führen zu Veränderungen im Schweißverhalten, was wiederum die elektrische Leitfähigkeit der Haut beeinflusst. Diese Veränderungen werden genutzt, um emotionale Erregung zu quantifizieren. EDA wird gemessen, indem entweder der elektrische Widerstand oder die Leitfähigkeit der Haut

	erfasst wird, was Aufschluss über das Ausmaß der emotionalen Erregung gibt. (Dawson et al., 2007; Pierański/Berčík, 2021)
Anwendung im urbanen Kontext	Durch EDA-Messungen erkannten Layeb et al. (2016), dass verschiedene Geräusche, welche häufig im urbanen Raum auftreten, z. B. Verkehrsgeräusche, zu Stress führen können. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Engelniederhammer et al. (2019) bei ihrer Untersuchung von Menschenansammlungen im städtischen Umfeld und den Auswirkungen auf die emotionale Reaktion von Fußgängern. Demnach erhöhen eine hohe Dichte und das Eindringen in den persönlichen Raum die Wahrscheinlichkeit von Stressreaktionen und einer aggressiven Grundstimmung. Kreuzungen, starker Verkehr und Orte mit ansprechender/interessanter Anmutung lösen ebenfalls emotionale Reaktionen aus (Harvey, 2024).
Tools	Für EDA-Messungen werden Q-Sensoren benötigt (Layeb et al., 2016), beispielsweise das Empatica-E4-Armband (Harvey, 2024).
Daten/Datenschutz	Gemessen wird bei dieser Methode die EDA, häufig in Verbindung mit der Temperatur, der Beschleunigung und dem Schallpegel (Layeb et al., 2016). Ergänzt werden die objektiven Daten meist durch subjektive Bewertungen der Umgebung (Harvey, 2024).
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	Die Messung kann mobil am gewünschten Ort stattfinden. Es sind mögliche Messartefakte durch physische Anstrengung zu beachten (Harvey, 2024). Pro Studienteilnehmer wurden für Orientierung, Spaziergang und Interviews in Harveys (2024) Studie ca. 60–90 Minuten aufgewendet.
Durchführung	Probanden werden mit einem EDA-Armband ausgestattet und gehen bspw. einen vordefinierten Pfad entlang. Während des Gehens werden kontinuierlich EDA-Daten (Hautleitfähigkeit bzw. Potenzial) und ggf. auch Umweltdaten gesammelt. (Harvey, 2024)
Mögliche Fehlerquellen	EDA-Daten sind in natürlicher Umgebung anfällig für Störungen und Artefakte. So können physische Anstrengungen die EDA-Daten beeinflussen. Außerdem misst EDA lediglich die emotionale Reaktion, nicht aber ob diese Reaktion positiv oder negativ ist. (Harvey, 2024). Außerdem unterscheidet sich EDA anhängig vom bspw. Alter, Geschlecht, Ethnie etc. (Pierański/Berčík, 2021).
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	Die Methode ist im Vergleich zu anderen Methoden für die physiologische Messung relativ kostengünstig (Pierański/Berčík, 2021).
Übertragbarkeit & Kombinations-möglichkeiten	EDA wurde bereits in urbanen Umgebungen (Harvey, 2024) und Innenstädten (Engelniederhammer et al., 2019) genutzt. Kombiniert wurde die Messung bereits mit GPS, Abstandssensoren (Engelniederhammer et al., 2019), Befragung, Umweltsensoren (Harvey, 2024), Schallpegelmesser (Layeb et al., 2016), EEG, Herzfrequenz (Dawson et al., 2007; Ergan et al., 2019) oder fNIRS (Kopton/Kenning, 2014).

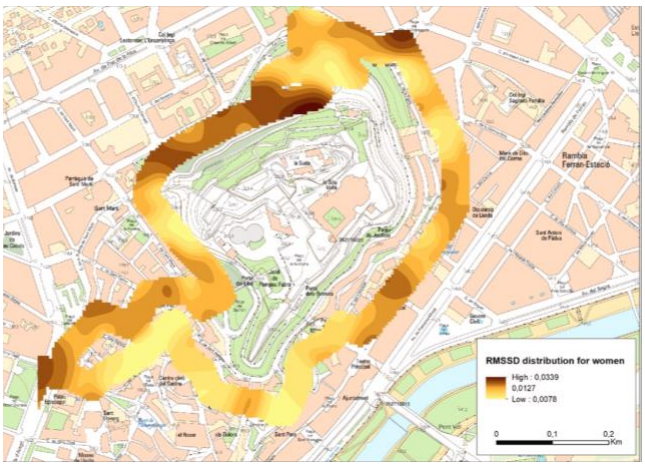
Beispiel-visualisierung	 **Abbildung 27: Beispielhafter Messaufbau 1 (Engelniederhammer et al., 2019)**  **Abbildung 28: Beispielhafter Messaufbau 2 (Pierański/Berčík, 2021)**

4.5.2 Messmethoden des Herz-Kreislauf-Systems

Das Herz-Kreislauf-System kümmert sich im menschlichen Körper darum, Stoffe (z. B. Sauerstoff, Nährstoffe, Hormone und Abfallprodukte) zu transportieren, indem das Blut durch den Körper zirkuliert. Aus diesem Grund bietet das Herz-Kreislauf-System wichtige Einblicke bei der Erfassung menschlicher Wahrnehmung und Verhaltensweisen, welche durch die Messung verschiedener physiologischer Reaktionen gewonnen werden.

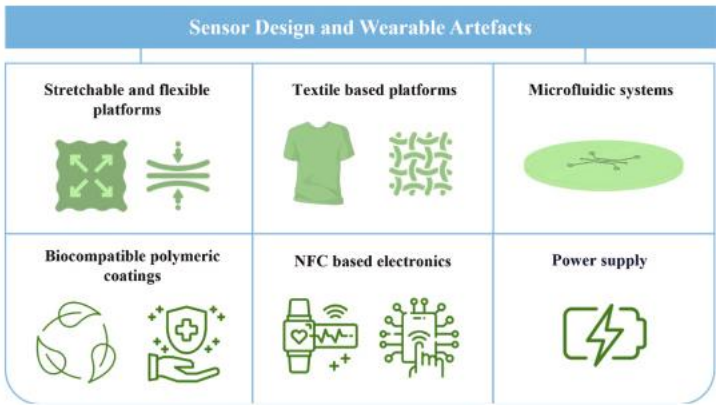
Herzfrequenz (Körper (Physiologie) – Herz-Kreislauf-System)	
Definition der Methode	Die Messung kognitiver Prozesse mittels Herzfrequenz nutzt in der Regel die Herzfrequenzvariabilität (engl. HRV, heart rate variability) bei welcher die Regelmäßigkeit der Zeiten zwischen den Herzschlägen gemessen wird. Dies wird durch das autonome Nervensystem gesteuert und lässt Rückschlüsse auf den Zustand des sympathischen und parasympathischen Nervensystems zu. Ein Ungleichgewicht kann auf Stress oder emotionale Erregung hinweisen.
Anwendung im urbanen Kontext	HRV wird bereits im urbanen Kontext genutzt. So wurde herausgefunden, dass Frauen in engen und überfüllten Umgebungen

	Stress empfinden, wohingegen Männer in offenen und weitläufigen Umgebungen gestresst sind (Agustí et al., 2022). Görgül/Yıldız Özkan, (2024) erkennen in ihrer Studie die beruhigende Wirkung von geschlossenen Straßenzügen und dass Verkehrskreuzungen zu Stress führen. Außerdem, so die Autoren, fördern Faktoren wie Sichtbarkeit des Himmels und Kontinuität des Straßenbildes das Wohlbefinden. Ergan et al. (2019) untersuchen menschliche Wahrnehmung in architektonischen Räumen mithilfe von VR und Sensorik (darunter HRV) und erkennen, dass helle Farben mit einer überdurchschnittlichen Lichtintensität zu einer geringeren Schweißbildung und Herzfrequenzvariabilität führen. Ebenso verringerte die Farbe Blau die Herzfrequenz von Studienteilnehmenden, was mit einem Abbau von Stress assoziiert wird, während Rot (in Abhängigkeit von Aktivitäten wie beispielsweise der Arbeit) im positiven Sinne eine höhere Herzrate erzeugt (AL-Ayash et al., 2016; Cha et al., 2020; Küller et al., 2009).
Tools	Eine Möglichkeit, HRV zu messen, ist der Einsatz des Polar-Electro-H7-Herzfrequenzsensors mit Smartphone und einer App (Agustí et al., 2022; Agustí et al., 2019). Die Aufzeichnung eines Elektrokardiogramms (EKG) zählt als einfache und genaueste Methode zur Messung der HRV.
Daten/Datenschutz	Daten werden als HRV über die Root Mean Square of Successive Differences (RMSSD) (Agustí et al., 2022) oder als Herzfrequenz im Allgemeinen (Görgül/Yıldız Özkan, 2024) gemessen.
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	Eine mobile Messung beim Gehen ist möglich (Agustí et al., 2022).
Durchführung	Probanden gehen eine festgelegte Strecke ab, die HRV und GPS-Daten werden währenddessen gesammelt und anschließend ausgewertet.
Mögliche Fehlerquellen	Die unterschiedlichen emotionalen Beziehungen der Menschen zu den Orten und die physische Anstrengung können die Daten beeinflussen (Agustí et al., 2022).
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	Agustí et al. (2022) und Agustí et al. (2019) nutzen handelsübliche Pulsgurte von Polar, welche weniger als 50 €/Stk. kosten. Da es sich um gebräuchliche Konsumentenprodukte handelt, ist die Nutzung einfach und die Komplexität sehr gering. Um die Daten zu loggen, ist eine passende App auf dem Smartphone notwendig. Alternativ ist eine Kopplung mit einem Mikrocontroller wie einem ESP8266 oder ESP32 (ca. 10 €/Stk.) denkbar.
Übertragbarkeit & Kombinations-möglichkeiten	Die Methode wird bereits im Kontext der Innenstadtforschung angewendet (Agustí et al., 2022). HRV kann mit GPS-Trackern und subjektiven Bewertungen gekoppelt werden (Agustí et al., 2022). Auch die Kombination mit mentalen/Gefühlskarten ist möglich (Agustí et al., 2019; Nold, 2006). Ergan et al. (2019) beschreiben den Einsatz von HRV zusammen mit VR, EEG und GSR.

Beispielvisualisierung	 **Abbildung 29: Darstellung einer beispielhaften Berechnung der RMSSD-Verteilung (Agustí et al., 2022)** **Abbildung 30: Beispiel einer Testperson mit benutzerdefinierter Sensorausrüstung und tragbarer Kamera (Görgül//Yıldız Özkan, 2024)**

Biosensoren (Körper (Physiologie) – Herz-Kreislauf-System)	
Definition Der Methode	Biosensoren sind Analysegeräte, bei denen eine biologische Komponente, wie ein Enzym, Antikörper oder Mikroorganismus, direkt mit einem Signalwandler (z. B. einer Elektrode oder optischen Faser) verbunden ist. Biosensoren sind eine Untergruppe der chemischen Sensoren und dienen zur Bestimmung chemischer Parameter wie Konzentrationen von Substanzen. Die biologische Komponente wandelt dabei den Analyten selektiv um (z. B. durch ein Enzym oder einen Mikroorganismus) oder erkennt ihn (z. B. durch einen Antikörper oder eine DNA-Sonde). Der Transducer wandelt die biochemische Reaktion (wie Sauerstoffverbrauch oder Ladungsänderungen) in ein optisches oder elektrisches Signal um, welches ausgewertet wird. (Schmid/Bilitewski, 1992)
Anwendung im urbanen Kontext	Im Rahmen der Stressforschung wird Cortisol, ein Steroidhormon und wichtiger Biomarker für die Stressbewältigung, untersucht (Karuppaiah et al., 2023). Besonders relevant ist der sogenannte Point-of-Care, welcher über elektrochemische Sensorik erwiesen werden kann. Roe et al. (2013) bewerten anhand der gemessenen

	Cortisolkonzentration im Speichel das Stressempfinden im Zusammenhang mit Grünflächen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Wohnen in Gebieten mit einem höheren Grünflächenanteil mit weniger Stress verbunden ist und Unterschiede zwischen den Geschlechtern auftreten.
Tools	Die Technik eines Biosensors beruht auf der Kombination eines biologischen Erkennungselements, wie Enzyme, Nukleinsäuren oder Antikörper, mit einem physikochemischen Wandler, der die biologische Reaktion in ein quantifizierbares Signal umwandelt. (Paul, 2024) In den vergangenen Jahren wird zunehmend an tragbaren Biosensoren geforscht, um die Veränderung besser aufzeichnen und auswerten zu können (Karuppaiah et al., 2023).
Daten/Datenschutz	Die durch Biosensoren erhobenen Daten sind hauptsächlich biochemische oder physiologische Messwerte, die durch die Reaktion eines biologischen Erkennungselements auf eine spezifische Substanz oder einen Zustand entstehen. (Paul, 2024)
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	Bei der CortisolMessung wird unter Einsatz eines Speichelentnahmegerätes eine Probe vom Teilnehmenden entnommen (selbstständig an jedem Ort durchführbar). Dabei ist es wichtig, 30 Minuten vor der Entnahme nichts zu essen oder zu trinken (außer Wasser) und nicht zu rauchen oder Ähnliches. Die Proben werden bis zur Analyse in einem Labor kühl gelagert. (Roe et al., 2013) Die Messung erfordert etwa 60 bis 90 Sekunden (Scheller et al., 1995). In der Studie von Roe et al. (2013) wird der Speichel an zwei aufeinanderfolgenden Wochentagen zu drei Tageszeitpunkten gemessen. Die Teilnehmenden wurden per SMS an die Probeentnahme erinnert.
Durchführung	Der Biosensor enthält ein biologisch sensibles Element (z. B. Enzym, Antikörper, Nukleinsäure), das spezifisch auf bestimmte Analyten (z. B. chemische Substanzen) reagiert. Dieses Element ist entweder direkt mit dem Signalwandler gekoppelt oder befindet sich in enger Nachbarschaft dazu. Der Signalwandler nimmt die Reaktion zwischen dem biologischen Element und dem Analyten auf. Die gemessene Reaktion erzeugt ein sekundäres Signal, das durch den Transducer übertragen wird. (Hall, 1995)
Mögliche Fehlerquellen	Für eine zuverlässige Messung muss der Sensor hohe Spezifität und gute Stabilität unter verschiedenen Betriebsbedingungen (wie Temperatur, pH-Wert) aufweisen (Hall, 1995). Die Entwicklung elektrochemischer CortisolSensoren steht dabei noch vor Herausforderungen (z. B. Biofouling, Probenvorbereitung, Empfindlichkeit, Flexibilität, Stabilität und Leistung der Erkennungsschicht) (Karuppaiah et al., 2023).
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	Cortisol Test Kits können in der Apotheke für rund 60 € frei verkäuflich erworben werden.
Übertragbarkeit & Kombinations-	Biosensoren lassen sich auf verschiedene Anwendungsbereiche übertragen, wie z. B. die medizinische Diagnostik, die Implantation

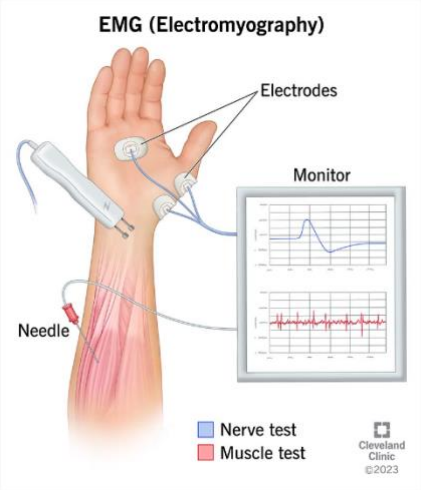
möglichkeiten	von Gluckse-Sensoren oder die Überwachung von Stoffwechselfunktionen (Schmid/Bilitewski, 1992). Für die Stadtforschung ist insbesondere die Cortisol-Forschung von Interesse (Roe et al., 2023).
Beispiel-visualisierung	**Abbildung 31: Schematische Darstellung des Grundkonzepts von Biosensoren (Schmid/Bilitewski, 1992)**  **Abbildung 32: Schematische Darstellung von zukünftigen Entwicklungen im Bereich tragbarer Biosensoren (Karuppaiah et al., 2023)**

4.5.3 Methoden zur Vermessung der Muskeln

Muskeln sind für viele lebenswichtige Funktionen des Körpers verantwortlich, ermöglichen Bewegung und tragen maßgeblich zur Körperhaltung bei. Unterschiedliche Muskeltypen sind für verschiedene willkürliche und unwillkürliche Bewegungen zuständig. Aus diesem Grund werden nachfolgend und abschließend Methoden zur Vermessung der Muskelaktivität vorgestellt, welche zum Verständnis der menschlichen Wahrnehmung und Verhaltensweisen eingesetzt werden können.

Elektromyografie (Körper (Physiologie) – Muskeln)	
Definition der Methode	Elektromyografie (EMG) bezeichnet die Messung der elektrischen Aktivität der Muskulatur (Wöhrle, 2024). EMG besteht aus Oberflächen-/Nadelelektroden, die auf der Haut über den Muskelfasern angebracht werden, um die Aktivität der Muskeln bzw. die Abfolge von Aktionspotenzialen motorischer Einheiten, die durch Muskelkontraktion erzeugt werden, zu messen. Die

	Untersuchung von Muskelaktivitäten und Koordinationsmustern durch EMG-Anwendungen ist ein nützliches Instrument zur Feststellung von motorischen Störungen, abnormer Muskelaktivität (z. B. Spastik) und zur Beurteilung der motorischen Erholung nach der Rehabilitation. (Brambilla et al., 2021)
Anwendung im urbanen Kontext	Jang et al. (2018) setzen EMG zur Untersuchung von visueller Komplexität und Verbraucherreaktionen bei Ladengestaltungen ein. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine angemessene visuelle Komplexität dazu beiträgt, dass Erregungsreaktionen bei den VebraucherInnen auftreten, welche in der Folge ein Eintreten fördern. EMG kann auch im Gesicht angebracht werden (eng. facial electromyography (FEMG)), beispielsweise um auf Grundlage der Hauttemperatur des Gesichts und der Mimik die Bewertung des thermischen Komforts in Innenräumen von Gebäuden zu untersuchen (Lu et al., 2023). Im Bereich der Ergonomie wird EMG insbesondere auch zur Evaluation von ergonomischen Bedingungen von Arbeitsplätzen eingesetzt (Marras, 2000; Kluth et al., 2013).
Tools	Es werden ein EMG-Gerät, sowie Nadel- oder Oberflächen-Elektroden benötigt. Nadel-EMG werden meist im medizinischen Bereich angewendet. Es wird zwischen drei verschiedenen Nadelelektroden unterschieden (Quasthoff, 2010): 1. bipolare konzentrische Nadelelektrode (am gebräuchlichsten) 2. monopolare Nadelelektrode 3. Einzelfaserelektrode Oberflächen-EMG (OEMG) erfassen die Potenziale an der Hautoberfläche mittels kreisförmiger Einwegelektroden mit einer aktiven Fläche aus Silber. Dabei ist eine schnelle Applikation durch integriertes Elektrodengel und einen selbstklebenden Elektrodenrand geboten. (Kluth et al., 2013)
Daten/Datenschutz	Es muss eine Normalisierung des komplexen Rohsignals, also des Elektromyogramms, bestehend aus Interferenzmustern mit positiven und negativen Peaks, vorgenommen werden. Die Amplitude steigt mit zunehmender Muskelinnervation (Bewegung zwischen wenigen bis zu über eintausend Hertz). Aus dem Rohsignal lassen sich verschiedene Kenngrößen berechnen und interpretieren (Kluth et al., 2013).
Ort der Durchführung & Zeitaufwand	Häufig werden EMG im Krankenhaus oder im Forschungszentrum angewendet. Beim Einsatz von dynamischen EMG muss insbesondere auf eine ordnungsgemäße Signalerkennung und -verarbeitung geachtet werden (Wehner, 2012).
Durchführung	Beim Einsatz von OEMG muss die Haut vorbereitet werden (Rasur der Körperbehaarung, Abreiben der Haut mit spezieller Paste zur Beseitigung von Hautpartikeln und Schmutz und zur besseren Anhaftung der Elektroden). Anschließend erfolgen die Ausrichtung und das Anbringen der Elektroden. (Steinhilber et al., 2013)

	Bei Nadel-EMG wird die Haut vor Einführen der Nadelelektrode desinfiziert. Die Nadel sollte senkrecht durch die Haut in den Muskel eingesetzt werden. (Quasthoff, 2010)
Mögliche Fehlerquellen	OEMG ist sehr einfach anzuwenden und daher leicht zu missbrauchen, zum Beispiel durch falsches Anbringen der Elektroden (Türker, 2013). Insbesondere bei dynamischen EMG ist darauf zu achten, dass Messfehler durch mangelnde Elektrodenkonfigurationen oder unpassende Elektrodengrößenauftreten können (Wehner, 2012).
Kosten-Nutzen/ Wirtschaftlichkeit/ Komplexität	Kommerzielle EMG-Geräte haben den Nachteil hoher Kosten (Fuentes del Toro et al., 2019). Unter Beachtung möglicher Einschränkungen (z. B. Rauschen oder Verzögerungen des Signals) gibt es jedoch seit einigen Jahren auch günstigere Alternativen (Da Silva et al., 2018).
Übertragbarkeit & Kombinations-möglichkeiten	EMG kann durch subjektive Erhebungsverfahren, wie Fragebögen, hilfreich ergänzt werden. Außerdem ist eine Kombination mit VR zur Darstellung der Stimuli möglich (Jang et al., 2018). Auch eine Kombination mit EEG zur Untersuchung des Einflusses architektonischer Formen wird in der Literatur aufgeführt (Banaei et al., 2017; Kim/Kim, 2022).
Beispiel-visualisierung	 **Abbildung 33: Schematische Darstellung eines EMG mit unterschiedlichen Elektroden (Cleveland Clinic, 2023)**

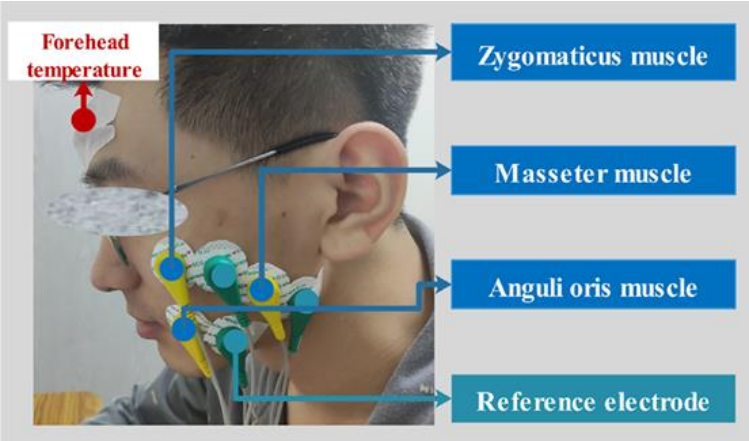


Abbildung 34: Beispiel der Anbringung von FEMG-Elektroden (Lu et al., 2023)

5 Übertragbarkeit der Messmethoden zur Entwicklung menschenorientierter Innenstadtkonzepte

Die Vielzahl der in dieser Literaturstudie identifizierten Messmethoden zur Erfassung menschlicher Wahrnehmung und Verhaltensweisen (vgl. Tabelle 1) verdeutlicht die hohe Interdisziplinarität des Themas. Verschiedene Fachdisziplinen, darunter Psychologie, Neurowissenschaften, Informatik, Geografie, Architektur und Ingenieurwissenschaften, beschäftigen sich mit den Einflüssen auf und ihrer Verarbeitung durch den Menschen, um daraus Erkenntnisse zur Weiterentwicklung unserer Umwelt zu gewinnen. Eindrucksvolle Forschungsinitiativen, wie beispielsweise das „Ecological Brain Project“ (Camargo et al., 2021, S.11) am University College London (UCL), bringen unzählige Fachdisziplinen zusammen, um die Forschung zum Handeln des Menschen in der realen Welt zu intensivieren (UCL, 2024). Allerdings bleibt eine immobilienwirtschaftliche Perspektive bislang unzureichend eingebunden. Doch schließlich ist es die menschliche Wahrnehmung und das Verhalten, welches entscheidend dafür ist, wie Immobilien, Gebäude und Städte erlebt und genutzt werden und damit ökonomisch nachhaltig sind.

Diese Ausgangssituation kann sich die Immobilienwirtschaft zunutze machen, um den weißen Fleck an ihrer Schnittstelle zu Neurowissenschaften zu erkunden. Zur Schaffung lebenswerter, nachhaltiger und menschenzentrierter Immobilien und (Innen-)Städte bedarf es der Entschlüsselung der Blackbox, die zwischen Gebäude und Mensch steht. Neurowissenschaftliche und physiologische Messmethoden können dazu beitragen, diese unbekannten Wirkungszusammenhänge zu verstehen, um beispielsweise erklären zu können, was Menschen warum in Städten machen und brauchen.

Die einzelnen identifizierten Methoden sind in unterschiedlichem Maße bereits zur Erforschung urbaner Fragestellungen eingesetzt worden. Allgemein lässt sich die Tendenz erkennen, dass der Einsatz von (Neuro-)Technologie zur Erforschung städtischer Qualitäten zunehmend etabliert wird, um objektiv quantifizierbare Ergebnisse zu erzielen. Häufig ist zusätzlich der Einsatz von subjektiven Erhebungsmethoden vertreten, um durch die Kombination von objektiven und subjektiven Datensätzen ein umfassenderes Verständnis von Räumen in Städten zu entwickeln (Andreani/Sayegh, 2017).

Das Spektrum der neurowissenschaftlichen Chancen für Wirtschaft, Stadtplanung und Gestaltung ist enorm. Zwei Teilbereiche der Neurowissenschaften, Neuroarchitektur und Neurourbanistik, bilden die Schnittstelle zwischen der Stadt- und Gesundheitsforschung und setzen bereits Methoden wie EEG, fMRI oder fNIRS ein. Die Messung der Gehirnaktivität wird durch physiologische Tests (z. B. Herzfrequenz und GSR) sowie selbst berichtete psychologische Beurteilungen ergänzt (Ancora et al., 2022). Damit deckt die Neurourbanistik

ein überaus relevantes Themenfeld ab und arbeitet dazu mit hochwissenschaftlichen Methoden. Allerdings werden bislang darin kaum immobilienwirtschaftliche Gedanken eingebunden. Jedoch kann sich die Beantwortung immobilienwirtschaftlicher Fragestellungen und der Forschung und Entwicklung menschenzentrierter Innenstädte an der Herangehensweise und den eingesetzten Methoden orientiert werden.

In Abhängigkeit des konkreten Vorhabens ist es notwendig, einen geeigneten Methodenmix zusammenzustellen. Dazu wird nachfolgend ein Methodenbaukasten, eingebettet in das kognitive System, vorgestellt und anschließend eine relative Potenzialabschätzung der einzelnen Methoden vorgenommen.

5.1 Methodenbaukasten

In der Studie konnte bisher gezeigt werden, dass ein Blick in diverse andere Fachdisziplinen eine Vielzahl von Methoden zur Erfassung menschlicher Wahrnehmungen und Verhaltensweisen offenbart. Teilweise werden die vorgestellten Methoden bereits im urbanen Kontext eingesetzt und könnten direkt in zukünftigen immobilienwirtschaftlichen Studien genutzt werden. Grundsätzlich hat sich gezeigt, dass selten ausschließlich eine Messmethode verwendet wird. Diese Erkenntnis ist wenig überraschend, wenn man die Struktur des kognitiven Systems bei der Entwicklung einer Methodenkombination miteinbezieht. Innerhalb des kognitiven Systems gibt es zahlreiche Messpunkte, an denen mithilfe diverser Methoden angesetzt werden kann. Die unterschiedlichen Ansätze weisen dabei alle Stärken und Schwächen zur Messung der Wahrnehmung und des Verhaltens der Menschen auf. Nachfolgend wird entlang der Prozesskette im kognitiven System auf die zuvor identifizierten Methoden eingegangen, um Kombinationsmöglichkeiten aufzuzeigen.

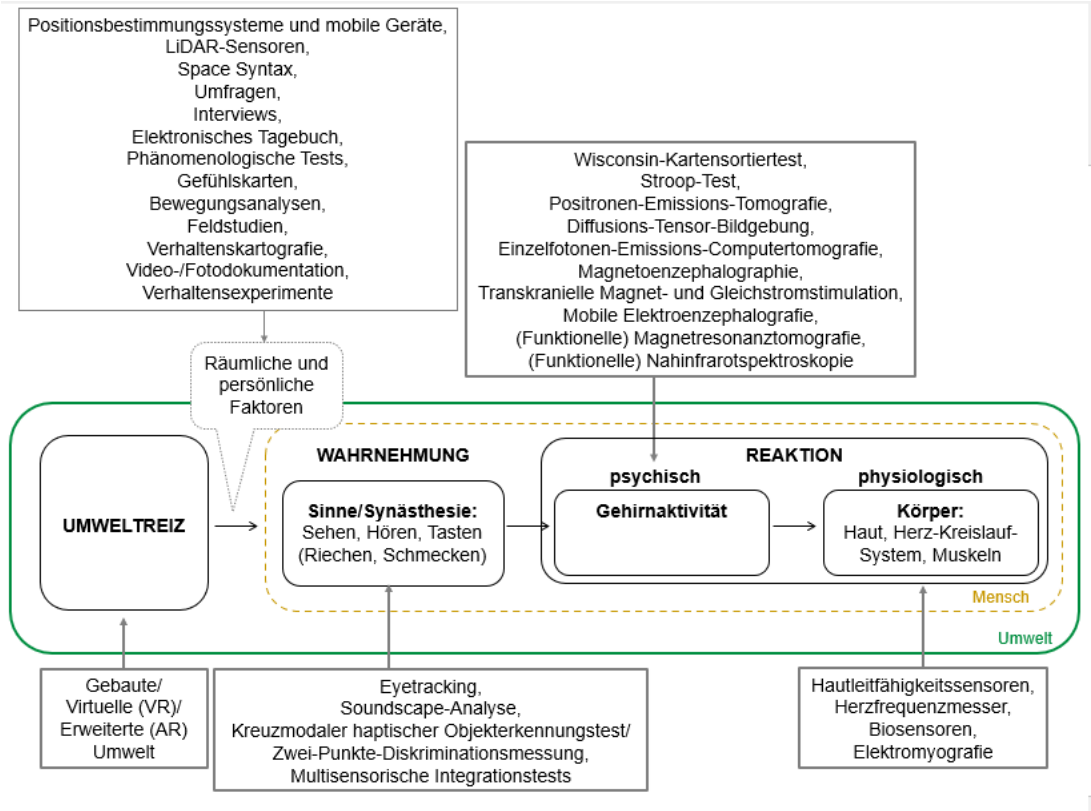


Abbildung 35: Integration der Methoden in die schematische Darstellung des kognitiven Systems (eigene Darstellung, 2024)

Umweltreiz setzen

Am Anfang des kognitiven Systems steht der Umweltreiz. Die meisten der zuvor genannten Methoden dienen dem Zweck, die Wahrnehmung, Verarbeitung und die darauffolgende Reaktion auf den Umweltreiz zu messen. Umweltreize lassen sich in zwei Kategorien einteilen, Realität vor Ort und virtuelle Realität. Die erweiterte Realität befindet sich zwischen diesen Polen. Dabei bringt die virtuelle Realität den Vorteil, dass auch in Planung befindliche Objekte an den Studienteilnehmern getestet werden können. Außerdem lassen sich die zu untersuchenden Sachverhalte separiert betrachten und andere potenzielle Störfaktoren besser ausblenden. Jedoch birgt die virtuelle oder erweiterte Realität die Gefahr, dass die Probanden sich nicht ausreichend in das Szenario hineinversetzen können (bspw. aufgrund unzureichender Auflösung, Qualität der Simulation oder ausbleibender Aktivierung anderer Sinne). Dadurch kann die Wahrnehmung und Reaktion der Probanden sich von Studien in der Realität unterscheiden. Jedoch können auch bei Umweltreizen an realen Orten Mess-artefakte die Interpretation der Messdaten erschweren. So können die gemessenen Reaktionen durch einen Umweltreiz ausgelöst worden sein, der nicht im Fokus der jeweiligen Studie steht. Sofern solche Umweltreize in einer Versuchsreihe nur bei einigen Teilnehmenden (bspw. Sirenengeräusche) auftreten, kann die Vergleichbarkeit darunter leiden.

Welche der Methoden zur Reizgebung Anwendung finden sollten, hängt von den Voraussetzungen ab. Soll die Wirkung eines geplanten Gebäudes oder dessen Teilbereiche auf die Probanden untersucht werden, bietet sich die Nutzung einer virtuellen Umgebung an. Sollen an einem bestehenden Objekt die Wirkung von Anpassungen im Bestand untersucht werden, bietet sich die Nutzung der erweiterten Realität oder virtuellen Realität an. Soll die Wirkung einer bestehenden Bebauung auf die Probanden zur Prüfung des Status quo getestet werden, bietet sich die Nutzung der Realität an. In jedem Fall ist der Umweltreiz ein integraler Bestandteil des zukünftigen Messkonzeptes.

Wahrnehmung erfassen

In der analysierten Literatur werden in der Regel Umweltreize, die visuell oder auditiv aufgenommen werden, durch Messmethoden erfasst. Um in Studien mit mobilem Setting festzustellen, welche Umweltreize wahrgenommen werden und eine folgende Reaktion hervorrufen, wird häufig Eyetracking genutzt. Dies kann helfen, neuronale und physiologische Reaktionen einem Umweltreiz zuzuordnen. Auditive Reize werden ebenfalls immer wieder in Studien mit mobilem Setting aufgezeichnet. Dies kann entweder über die Hauptmethode (Soundscape Walk) oder multisensorische Tests erfolgen. Die Erfassung und Aufzeichnung eingetroffener Reize aus der Umwelt ist wichtig, um Fehler bei der Zuordnung von neuronalen oder physiologischen Reaktionen zu Wahrnehmungen zu minimieren. Die Messung der Wahrnehmung ist somit ein wichtiger Bestandteil des zukünftigen Messkonzeptes, welches die Qualität der Dateninterpretation maßgeblich beeinflusst.

Reaktion objektiv messen

Die Reaktion auf die Umweltreize lässt sich in psychische/neurologische und physiologische Reaktionen aufteilen. Die neurologischen Reaktionen finden im Gehirn der Menschen statt. Hier werden entweder direkt über die Gehirnaktivität oder indirekt über Verhaltensweisen Rückschlüsse auf die kognitiven Prozesse der Probanden gezogen. Andere Ansätze messen physiologische Reaktionen, die oftmals durch das autonome Nervensystem hervorgerufen werden und deshalb nicht direkt durch die Probanden gesteuert werden können. Bei der Untersuchung der Wahrnehmungen und Verhaltensweisen im Innenstadtkontext sind besonders die direkten neuronalen und die physiologischen Reaktionen von Interesse.

Alle in der Kategorie genannten Methoden in den Steckbriefen messen die neuronale Reaktion in den Hirnarealen. Sie unterschieden sich jedoch in ihrer zeitlichen und räumlichen Auflösung. Je nach notwendigen Detaillierungsgrad der Messergebnisse, Ort der Reizsetzung (mobil oder im Labor) kommen unterschiedliche Methoden infrage. Vor Ort bieten sich mobile Systeme wie mEEG oder mobile fNIRS an, welche die neuronale Reaktion auf bestimmte Umweltreize

messen können. Die Reizsetzung kann währenddessen auch mittels erweiterter Realität ergänzt werden. In den stationär stattfindenden Studien, in denen die Umweltreize mittels Bilder, Videos oder virtueller Realität gesetzt werden, können neben den vorher genannten Methoden auch aufwendigere Methoden wie (funktionelle) Magnetresonanztomografie oder Computertomografie und deren methodische Derivate genutzt werden. Durch Kombination der Methoden kann der Detaillierungsgrad der Messdaten verfeinert werden. Ob dies für die jeweilige Studie notwendig ist, muss situativ entschieden werden.

Neben der direkten Messung der neuronalen Aktivität und damit kognitiver Prozesse können auch physiologische Daten wichtige Rückschlüsse auf Emotionen wie Stress, Angst oder Aufregung geben. Die Messung dieser Daten kann ergänzend zu den vorher genannten Methoden den Detaillierungsgrad und Erkenntnisgewinn steigern und Interpretationen validieren. Im Gegensatz zur Messung der neuronalen Aktivität ist die Messung von physiologischen Markern in der Regel kostengünstiger und die Ergebnisse sind häufig etwas leichter ohne neurologische Fachkenntnisse zu interpretieren.

Beeinflussung durch räumliche und persönliche Faktoren erkennen

Räumliche und persönliche Faktoren beeinflussen bzw. prägen die Wahrnehmung von Umweltreizen. Dies können beispielsweise Alter, Geschlecht, Kultur, Bildung, Religion oder Gesundheitszustand sein. Genauso wirken Formen, Geometrien, Layouts, Materialien, Farben, Ausstattungen und Indoor-Environmental-Quality-Faktoren auf Menschen unterschiedlich. Auch wenn eine Vielzahl von Umweltreizen gemessen werden kann, müssen neuronale oder physiologische Reaktionen nicht immer durch direkt protokollierbare Phänomene ausgelöst worden sein. Beispielsweise können individuelle Faktoren außerhalb des Experiments zu neuronalen oder physiologischen Signalen geführt haben oder zu einer außergewöhnlichen Reaktion auf geplante Umweltreize führen. Aus diesem Grund sollten die Messmethoden mit subjektiven Erhebungsmethoden, z. B. einem Interview und/oder Fragebogen, vor, während und/oder nach dem Experiment begleitet werden. Denn auch diese Erkenntnisse sind entscheidend für eine qualitativ hochwertige Interpretation der Daten.

5.2 Potenzialabschätzung der Methoden

Unterschiedliche städtische Orte beeinflussen die Emotionen, das Erleben, die Wahrnehmung und das Verhalten des Einzelnen verschieden (Al-Husain et al., 2013). Diese unterschiedlichen Empfindungen zu verstehen, ist für Wissenschaft und Praxis im Bereich der Stadtforschung von großer Relevanz. Aus diesem Grund wächst das Interesse, psychologische und psychophysiologische Verhaltensweisen in alltäglichen Situationen zu erforschen. Seit der Entwicklung sogenannter „Wearables“, womit kleine Computersysteme bezeichnet werden,

die Menschen direkt am Körper tragen und in welche Sensoren integriert sind, ist die mobile Erfassung objektiver Vitaldaten deutlich erleichtert worden (Ebner-Priemer et al., 2019). Doch bei Weitem nicht alle und insbesondere wenige neuronale Messungen lassen sich bislang vollständig mobil durchführen.

Die mobile Einsatzfähigkeit ist nur ein Aspekt, welchen es bei der Potenzialabschätzung der identifizierten Methoden zu berücksichtigen gilt. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der Potenziale und Grenzen der Methoden zur Darstellung der Umwelt und der Messmethoden auf. Darin werden in sechs Kategorien ihre Vor- und Nachteile in Bezug auf mobile Einsetzbarkeit, Kosten, spontane Durchführbarkeit, Messstörungen, Notwendigkeit fachlicher Expertise bei der Datenauswertung und Innovationsgrad für die Stadtforschung beurteilt. Die qualitative Bewertung basiert auf den Literaturergebnissen und ist im Verhältnis der Methoden zueinander vorgenommen.

Tabelle 2: Potenziale und Grenzen der Methoden (eigene Darstellung, 2024)

	Legende:	Mobil einsetzbar (++ vollständig bzw. -- gar nicht; 0 neutral; / keine Aussage möglich)	Kosten pro Teilnehmer*in / der Technik (++ günstig bzw. -- teuer; 0 neutral; / keine Aussage möglich)	Spontane Akquise/ Durchführung möglich (++ sehr gut bzw. -- sehr schlecht; 0 neutral; / keine Aussage möglich)	Messstörung/ Messartefakte (Beeinflussung des Bewusstseins/ Verhalten durch Methode) (++ keine Beeinträchtigung bzw. - - starke BIAS; 0 neutral; / keine Aussage möglich)	Auswertung eigenständig möglich (++ keine Fachexpertise notwendig bzw. -- Externe Unterstützung ratsam; 0 neutral; / keine Aussage möglich)	Neuheit in der Stadtforschung (++ Innovative Methode bzw. -- etabliert in der Stadtfoschung; 0 neutral; / keine Aussage möglich)
Umwelt	Augmented Reality	++	+	++	/	/	+
	Virtual-Realtiy-Umgebungen	++	+	++	/	/	+
	Positionsbestimmungssysteme und mobile Geräte	++	++	++	-	++	--
	LiDAR-Sensoren	0	++	/	++	-	0
	Space Syntax	/	++	/	/	++	0
(Verhaltens-)Reaktion	Umfragen	++	++	++	--	++	--
	Interviews	++	++	++	-	++	--
	Elektronisches Tagebuch	++	++	-	0	++	--
	Phänomenologische Tests	/	++	+	-	++	-
	Gefühlskarten	++	++	++	--	++	-
	Bewegungsanalyse	++	++	0	++	++	--
	Feldstudien	++	++	+	-	++	--
	Verhaltenskartografie	++	++	+	-	++	-
	Video-/Fotodokumentation	++	++	++	-	++	-
	Verhaltensexperimente	++	++	++	0	++	0
Wahrnehmung	Eyetracking	++	+	++	+	++	+
	Soundscape-Analyse	++	+	++	-	++	-
	Kreuzmodaler haptischer Objekterkennungstest und Zwei-Punkt-Diskriminationsmessung	++	++	++	-	++	/
	Multisensorische Integrationstests	--	--	--	-	--	/
Psyche	Wisconsin-Kartensortiertest	-	++	+	-	++	/
	Stroop-Test	-	++	+	-	++	0
	(Funktionelle) Magnetresonanztomografie	0	--	--	+	--	+
	Positronen-Emissions-Tomografie	--	--	--	+	--	/
	Diffusions-Tensor-Bildgebung	--	--	--	+	--	/
	Einzelfotonen-Emissions-Computertomografie	--	--	--	+	--	/
	Magnetoenzephalografie	-	--	--	+	--	/
	Transkranielle Magnet- und Gleichstromstimulation	--	--	--	+	--	/
	Mobile Elektroenzephalografie	++	-	+	0	--	+
	(Funktionelle) Nahinfrarotspektroskopie	++	-	+	0	--	++
Körper (Physiologie)	Hautleitfähigkeitssensoren	++	+	+	0	0	++
	Herzfrequenzmesser	++	++	++	0	0	+
	Biosensoren	++	++	++	+	0	0
	Elektromyografie	+	+	+	0	0	+

Die Kosten pro Teilnehmenden und für die benötigten Technologien variieren deutlich. Je nach Studie und Forschungsfrage muss sehr genau abgewogen werden, welche Investitionen getätigt werden sollen, um die benötigten Daten zu erheben. Zur Durchführung der Messungen muss nicht immer das gesamte Equipment erworben werden. Insbesondere beim Einsatz von bildgebenden Verfahren der Neurowissenschaften ist dies im Rahmen einer einzelnen Studie nicht wirtschaftlich oder gar undenkbar, sodass beispielsweise Kooperationen mit Forschungszentren in Betracht gezogen werden sollten.

Viele Methoden zur Erfassung von (Verhaltens-)Reaktionen, Wahrnehmung und physiologischen Körperreaktionen besitzen das Potenzial mobil eingesetzt werden zu können (z. B. Interviews, Eyetracking oder Herzfrequenzmessung). Viele neurologische Messmethoden kommen in diesem Punkt, mit dem heutigen Stand der Technik, an ihre Grenzen. Da sie in Labor-Set-ups durchgeführt werden, wird ihr Einsatz im urbanen Kontext erschwert. Nichts desto trotz ist durch die Kombination der Methode mit VR-Applikationen zur Erzeugung einer virtuellen Umgebung der Einsatz nicht unmittelbar ausgeschlossen. Zudem ist mit zunehmendem technologischem Fortschritt davon auszugehen, dass selbst für Methoden, welche bislang ausschließlich in unbeweglichen Settings durchgeführt werden konnten, in Zukunft mobile Apparaturen entwickelt werden (vgl. PET).

Eng mit der Möglichkeit einer mobilen Durchführbarkeit verknüpft ist die Leichtigkeit oder Schwere einer spontanen Akquise von Studienteilnehmenden. Kim und Kim (2022) präsentieren in ihrem Literaturüberblick zum Einsatz biometrischer Werkzeuge in architektonischen Umgebungen eine Übersicht der demografischen Daten von Studienteilnehmenden. Daraus geht hervor, dass zur Erforschung von Umgebungen und Umgebungselementen unter Einsatz von neurowissenschaftlichen und physiologischen Messmethoden meist nur zweistellige Stichprobengrößen vorliegen. Je komplexer der Studienaufbau, desto anspruchsvoller wird außerdem eine spontane Durchführung. Es ist jedoch davon auszugehen, dass trotz potenzieller Herausforderungen bei der Rekrutierung von Teilnehmenden diese aufgrund des hohen Neuheitswerts des Versuchsaufbaus vergleichsweise leicht gewonnen werden können, da das innovative Forschungsdesign großes Interesse auslöst.

Die Gefahr der Beeinflussung des Bewusstseins oder Verhaltens ist bei der Durchführung wissenschaftlicher Studien immer eine besondere Herausforderung. Um diese Messstörungen bestmöglich zu reduzieren, bieten neurologische und physiologische Methoden ein herausragendes Potenzial. Dennoch gilt es, insbesondere bei der Durchführung mobiler Messverfahren, darauf zu achten, dass Messartefakte bestmöglich vermieden werden. Verzerrungen oder Fehler in Daten, die während des Messprozesses entstehen und nicht auf

das tatsächliche Untersuchungsobjekt zurückzuführen sind, können durch subjektive Erhebungsmethoden identifiziert und bereinigt werden. Insbesondere in der interdisziplinären Forschung, wie sie durch die Anwendung neurowissenschaftlicher Methoden in der immobilienwirtschaftlichen und Stadtforschung entsteht, erfordert die Analyse neurologischer und physiologischer Daten spezialisierte Fachexpertise. Nur so können valide und differenzierte Schlussfolgerungen gewährleistet werden. Dies stellt einen relevanten ethischen Hinweis zur wissenschaftlichen Prüfung dar, da ohne entsprechendes Expertenwissen bei einigen Methoden das Risiko fehlerhafter Interpretationen besteht, was zu verzerrten Interpretationen führen kann (Poldrack, 2006). Die Einbindung solcher Expertise ist daher essenziell, um einer unzulässigen Vereinfachung der wissenschaftlichen Erkenntnisbildung vorzubeugen und die Integrität der Forschung zu wahren.

Abschließend ist die Innovationskraft der Methoden im Kontext der Stadtforschung bewertet. Nicht immer muss eine besonders innovative Methode die besten Ergebnisse erzielen, doch birgt ihr häufig die größte Chance, bislang unerforschte Zusammenhänge zu untersuchen und neue Erkenntnisse zu liefern.

5.3 Mögliche Anwendungsszenarien im Entstehungsprozess

Um die Anwendung der verschiedenen Techniken zu verdeutlichen, werden im Folgenden zwei mögliche Anwendungsszenarien aus der Projektentwicklung anhand des zuvor vorgestellten Methodenbaukastens durchgespielt. Alle drei folgenden Szenarien stellen typische Entscheidungsprobleme bei Projektentwicklungen in Innenstädten dar, bei denen die zuvor genannten Methoden helfen können, eine optimale Lösung für lebenswerte Innenstadtimmobilien zu finden. Im ersten Szenario gilt es, die optimale Menge von sichtbaren Holzelementen in einer Fläche zu untersuchen. In dem zweiten Szenario soll der optimale Belegungsgrad dieser Fläche bestimmt werden. Das dritte Szenario beschreibt die Übertragbarkeit des Methodenbaukastens für die Validierung der sozialen Dimension im Kontext von ESG.

5.3.1 Wirkung von Materialität und Holzoberflächen auf Nutzererleben und Wohlbefinden

Bei der Projektentwicklung und Flächenplanung ist neben Lage, Zuschnitt und Erschließung auch die Materialität und deren gezielte Sichtbarkeit ein integraler Bestandteil der Qualitätsfrage. Die Wahl der Oberflächen beeinflusst dabei vor allem visuelle Reize, aber auch akustische und olfaktorische. Die Fragestellung geht dabei über rein ökonomische Faktoren zur Herstellung und Instandhaltung hinaus. Materialität und Gestaltung sind ein wichtiger Faktor für die Wahrnehmung der Immobilie durch die Nutzer – und können deren Bereitschaft beeinflussen, eine Fläche zu nutzen und sich dort aufzuhalten. Eine höhere Aufenthaltsqualität kann zu einer erhöhten Frequentierung führen und damit zum wirtschaftlichen Erfolg der Fläche beitragen. Im Kontext dieser Untersuchung ist insbesondere der visuelle Reiz und Effekt auf die Menschen von Interesse. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Materialität einen Einfluss auf die Psyche und das Wohlbefinden haben kann. So kann eine Holzverkleidung den Blutdruck bei Personen signifikant senken (Sakuragawa et al., 2005). Außerdem zeigt sich, dass Holzoberflächen Stress reduzieren und sich positiv auf das Wohlbefinden auswirken (Frunzio et al., 2023). Neben der Materialwahl lässt sich auch der gezielte Einsatz weiterer Designelemente wie Begrünung untersuchen. So konnte ein anderes Experiment von Choi et al. (2016) mithilfe der Messung der Herzfrequenzvariabilität und Hirnaktivitäten mittels EEG nachweisen, dass ein erhöhter Grünanteil in Gebäuden eine entspannende Wirkung auf das Gehirn und das autonome Nervensystem hat.

Da die Fläche bereits in der Planungsphase untersucht werden sollte, bietet sich für die Umweltreize eine virtuelle Realität (VR) an. Im Fall eines Redevelopment bietet sich ebenfalls die Nutzung der erweiterten Realität (AR) an. Im Folgenden wird die Nutzung von VR ausgewählt. Als Grundlage können – sofern in der Projektphase bereits vorhanden –

gerenderte CAD-Inhalte mit den verschiedenen Materialien und Anmutungen dienen. Um die Materialität realistischer gestalten zu können, können die Nutzenden mit der virtuellen Umgebung in Echtzeit interagieren, indem sie spezielle elektronische Ausrüstung (z. B. Datenbrille und -handschuhe) tragen (Bohil et al. 2011). Die Nutzung von VR ermöglicht eine flexible Wahl des Ortes des Experiments. Dies kann bspw. vor Ort in der Innenstadt oder in einem Bürgerworkshop durchgeführt werden.

Um den Effekt der verschiedenen Gestaltungsalternativen der Fläche auf die Probanden zu messen, können neuronale als auch physiologische Daten untersucht werden. Die Verarbeitung der Sinneseindrücke im Gehirn kann einen Eindruck über den tatsächlichen Einfluss auf die Probanden geben. Zur Auswahl der passenden Methoden wird anhand des Methodenbaukastens (s. Kapitel 5.1) exemplarisch ein adäquater Methodenmix zusammengestellt. Die Methoden werden in der Reihenfolge des Baukastens dargestellt. Der Fokus liegt bei dieser visuellen Stimulation auf dem Eyetracking und den kognitiven und physiologischen Reaktionen. Die hier aufgeführten Methoden sollten mit Umfragen und Interviews ergänzt werden.

Die Gehirnaktivität kann parallel zum Eyetracking erfasst werden. Durch die gleichzeitige Messung von Augenbewegungen und Hirnaktivität mittels EEG lässt sich der räumliche Einfluss differenziert analysieren und deutlicher darstellen (Casson et al., 2018). Die Auswertung der Information über die betrachteten Bereiche in Verbindung mit den Aktivitäten der verschiedenen Hirnareale kann Hinweise auf die Wirkung der getesteten Gestaltungsvarianten geben. Ergänzend zu der technisch aufwendigen direkten Messung der Hirnaktivitäten bietet die Messung von physiologischen Markern eine meist kostengünstige Ergänzung. Physiologische Daten geben Hinweise auf Reaktionen des autonomen Nervensystems, sind einfacher zu erhalten, haben aber trotzdem eine hohe Aussagekraft. In diesem Beispiel wird die Herzfrequenzvariabilität in Verbindung mit der Hautleitfähigkeit als Indikator gewählt. Diese kann die Ergebnisse der Hauptmethode ergänzen bzw. dabei helfen, diese zu validieren. Eine Verbesserung der parasympathischen Aktivität kann dabei als Indikator für Entspannung der Probanden dienen (Choi et al., 2016).

Da sich physiologische Reaktionen und Emotionen aus einer Vielzahl von Einflussfaktoren zusammensetzen, ist bei der Interpretation der Ergebnisse besondere Sorgfalt geboten. Einzelne Veränderungen im Experimentaufbau können zwar messbare Effekte zeigen, tragen jedoch nicht zwangsläufig in dem gewünschten Maß zum Gesamtergebnis bei, etwa zur Verbesserung des Wohlbefindens oder zur Reduktion von Stressreaktionen. Weitere Limitationen entstehen durch den Umfang der Messung und der Vorbereitung. So können bei einer Untersuchung von zwei Alternativen nicht mehrere Änderungen einzeln untersucht

werden. Wenn z. B. bei einer Untersuchung der Farbton und das Muster verändert werden, kann zwar eine allgemeine Aussage über eine Präferenz getroffen werden, aber nicht, ob die Präferenz aufgrund des Farbtons oder des Musters getroffen wurde. Bei einer differenzierten Betrachtung jeder Möglichkeit kann der Untersuchungsaufwand exponentiell steigen.

Zu beachten ist, dass jeder Mensch auf dieselben Reize aufgrund bspw. individueller Erfahrungen unterschiedlich reagieren kann. Ein möglicher Versuchsablauf wird in Abbildung 36 aufgezeigt.

5.3.2 Ermittlung der optimalen Belegungsraten und Raumlayouts in der Projektentwicklung

Ein zentrales Problem in der frühen Planungsphase von Projekten ist die Festlegung einer optimalen Belegungszahl für multifunktionale Räume oder die Ermittlung des bestmöglichen Raumlayouts bei gegebener Personenzahl. Die Anzahl der sich in einem Raum aufhaltenden Personen kann das individuelle Wohlbefinden signifikant beeinflussen, insbesondere wenn die Belegungsdichte subjektiv als zu hoch wahrgenommen wird („Crowding"). Empirische Untersuchungen zeigen, dass eine erhöhte Belegungsrate, gemessen an physiologischen Indikatoren, zu einem Anstieg von Stress führt. Zudem werden Hirnareale aktiviert, die für Fluchtverhalten relevant sind (Evans, 1979). Darüber hinaus kann eine hohe Belegungsdichte in Verbindung mit entsprechendem Lärm die Leistungsfähigkeit von bspw. Nutzer und Nutzerinnen mindern (Nagar et al., 1987).

Die subjektiv wahrgenommene Belegungsrate, die Einschränkung des persönlichen Raums durch andere Personen sowie der mit Menschenansammlungen einhergehende Lärm beeinflussen in besonderem Maße das Erleben der Raumsituation. Um diese Effekte bereits vor Fertigstellung eines Gebäudes umfassend untersuchen zu können, empfiehlt sich der Einsatz von Virtual Reality (VR). Auf diese Weise lassen sich unterschiedliche Belegungsraten oder Raumgestaltungen unter konstanten Rahmenbedingungen simulieren und evaluieren. Experimente in realen oder erweiterten (AR-)Umgebungen sind hingegen erst nach Fertigstellung des Bauvorhabens adaptierbar. Da akustische Reize in diesem Zusammenhang eine entscheidende Rolle spielen, ist es sinnvoll, neben visuellen auch auditive Stimuli gezielt zu variieren und ihre Auswirkungen mithilfe einer Soundscape-Analyse zu erfassen. Verschiedene Belegungsdichten, sich verändernde Abstände zwischen Personen und unterschiedliche Geräuschkulissen können in Kombination getestet werden. Die Erfassung der Effekte erfolgt über mehrere Indikatoren, die im Methodenbaukasten (Kapitel 5.1) ausführlich beschrieben sind.

Um eine optimale Personenzahl empirisch bestimmen zu können, ist es erforderlich, die Belegungszahl vor jedem Testlauf flexibel anzupassen. Dies ermöglicht das Durchspielen

unterschiedlicher Belegungsraten und die Ermittlung entsprechender Reaktionen. Zur Messung der durch die Personenzahl induzierten Effekte auf einer multifunktionalen Fläche sollte auf mehrere der in Kapitel 4 dargelegten Methoden zurückgegriffen werden. Die Reaktionen können sowohl psychischer als auch physiologischer Natur sein. So kann beispielsweise ein EEG, analog zur Messung der Materialität, eingesetzt werden, um neuronale Korrelate von Stressreaktionen zu erfassen. Eine häufige negative Reaktion auf Menschenansammlungen ist das Erleben von Stress. Eine praktikable Messmethode hierfür, wie sie in Engelniederhammer et al. (2019) und Harvey (2024) empfohlen wird, ist der Einsatz von Hautleitfähigkeitssensoren (vgl. Kapitel 4.5.1). Demnach erhöhen eine hohe Belegungsdichte und die Überschreitung persönlicher Distanzzonen die Wahrscheinlichkeit für Stressreaktionen und eine tendenziell aggressivere Grundstimmung. Die Herzfrequenzvariabilität kann einen weiteren Aufschluss über Stressniveaus bieten. Agustí et al. (2022) wiesen nach, dass Frauen in engen und stark frequentierten Räumen eher Stress erleben, wohingegen Männer in offenen und weitläufigen Umgebungen stärker belastet reagieren (siehe Kapitel 4.5.2). Mithilfe eines EMG können zusätzlich die Aktivitätsmuster der Gesichtsmuskulatur erfasst werden, um Rückschlüsse auf die Zufriedenheit der Teilnehmenden zu ziehen (Kim et al., 2022). Auch Temperatureinflüsse auf das Nutzererleben lassen sich auf diese Weise abbilden (Lu et al., 2023).

Neben physiologischen und psychischen Indikatoren ist auch die Erfassung sichtbarer Verhaltensreaktionen von Interesse. Exemplarisch sei hier die Erhebung von Laufwegen genannt. Die Analyse typischer Bewegungsmuster mittels Indoor-Positionsbestimmung kann eine nutzerorientierte Optimierung der multifunktionalen Fläche unterstützen. Abhängig vom Planungsstadium können die Laufwege entweder direkt im VR-Programm aufgezeichnet oder, in realen Testumgebungen, mithilfe von Sensoren erfasst werden. Davidson et al. (2016) empfehlen in diesem Zusammenhang den Einsatz eigenständiger Sensoren („self-contained sensors“) sowie Smartphone-Tracking über WLAN und Bluetooth. Aus den aufgezeichneten Daten lassen sich bevorzugte Bewegungsmuster, Aufenthaltsbereiche sowie potenzielle Barrieren identifizieren, die wiederum Rückschlüsse auf die Raumwirkung und funktionale Eignung einzelner Zonen ermöglichen und Optimierungspotenziale aufdecken.

Obwohl die dargestellten Messmethoden vielfältige Vorteile bieten, gilt es, auch ihre Grenzen zu berücksichtigen. Zusätzliche Messungen können die Ergebnisse zwar präzisieren, steigern jedoch mitunter den Aufwand unverhältnismäßig. Darüber hinaus ist darauf zu achten, die Anzahl der in einem Durchgang präsentierten Reize nicht zu hoch anzusetzen, um klare und eindeutige Resultate zu erhalten. Ein möglicher Versuchsablauf wird in Abbildung 36 illustriert. Bei der Versuchsplanung ist insbesondere eine sorgfältige Zeitplanung sowie eine

umfassende Vorbereitung der Studie notwendig. Die Auswahl der vorgestellten Techniken ermöglicht die simultane Erfassung aller relevanten Messwerte.

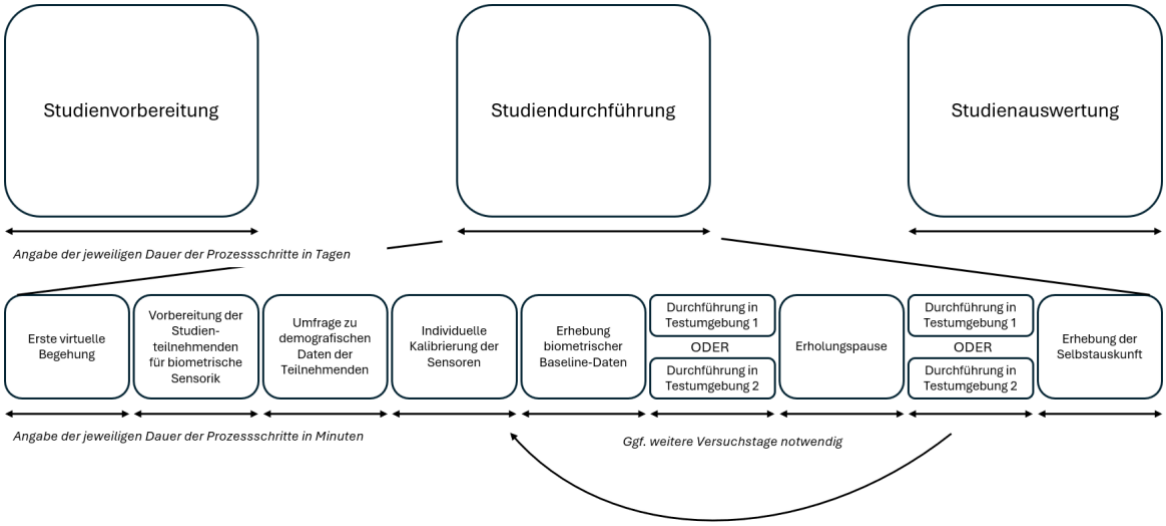


Abbildung 36: Exemplarische Darstellung einer möglichen Studiendurchführung mit VR, Eyetracking, HVR, GSR, EMG und Umfrage (eigene Darstellung, 2024 in Anlehnung an Ergan et al., 2018)

5.3.3 Neurologische und physiologische Messung des „S“ in ESG

Seit dem EU Green Deal ist ESG ein zentraler Faktor für Immobilienentwicklungen und -investitionen. Für die Bereiche „Environment“ und „Governance“ existieren bereits umfangreiche Richtlinien und Regelwerke. Deutlich weniger greifbar ist bislang die soziale Komponente – also das „S“ in ESG – und wie sie messbar gemacht werden kann (Salzberger et al., 2024; Newell, 2024; Robinson & McIntosh, 2022). Gerade dieser Aspekt ist jedoch elementar: Die soziale Dimension kann den operativen wirtschaftlichen Erfolg einer Immobilie direkt und maßgeblich beeinflussen. Faktoren wie das Wohlbefinden der Nutzer oder die Bedeutung der Immobilie im Quartier gewinnen deshalb an Bedeutung. Es braucht dringend neue Metriken, um diese Aspekte messbar zu machen (Newell, 2024). Projektentwickler können so gezielt zum Gemeinwohl und zur sozialen Integration im Umfeld beitragen (Straube, 2024). Dafür sind innovative Konzepte gefragt – insbesondere räumlich. Erdgeschosse und oberste Etagen können kreative Formen des Retails beherbergen, wie z. B. offene Marktplatzformate oder Flächen mit Dachgeschossaktivierung. Noch besser sieht es bei Zwischengeschossen aus, etwa in ehemaligen Warenhäusern: Aufgrund ihrer bisherigen Unterbewertung und der geringen öffentlichen Erwartungshaltung bieten sie großes Potenzial. Dabei können Zwischengeschosse besonders gut als ein Treffpunkt und Begegnungsort verschiedener Milieus genutzt werden, da diese ähnliche Anforderungen an Zwischengeschosse haben (Pfnür/Rau, 2024). Daraus ergeben sich Chancen, der sozialen Dimension der Innenstadt neuen Raum zu geben – und städtisches Leben aktiv mitzugestalten.

Der vorhandene Raum in Zwischengeschossen muss so gestaltet werden, dass er den sozialen Stellenwert eines Gebäudes und seiner Umgebung spürbar stärkt. Konkret bedeutet das, dass ein Ort der Begegnung und des Austausches geschaffen werden soll. Entscheidend sind dabei sowohl die visuelle Anmutung (Alexandris et al., 2006; Whyatt, 2004) als auch das Nutzungskonzept, das maßgeblich über den Erfolg eines Projekts entscheidet (DeLisle/Grissom, 2013). Ein gelungenes Nutzungskonzept vereint unterschiedliche Funktionen – etwa Handel, Arbeiten und Aufenthalt – zu einem stimmigen Erlebnis. Ziel ist es, die vielfältigen Bedürfnisse der Nutzer zu bedienen, Wohlbefinden zu fördern und eine positive emotionale Reaktion hervorzurufen. Dies geschieht am besten durch Orte oder Räume, die eine Identität schaffen. So kann die soziale Komponente eine dauerhafte positive emotionale Bindung an den Ort entstehen lassen, wichtig dafür ist z. B. die Wahrnehmung des Raumes. Derzeit basieren solche Konzepte meist noch auf Erfahrungswerten. Um den tatsächlichen Nutzen für Besucher besser erfassen zu können, lassen sich jedoch auch hier die im vorherigen Kapitel beschriebenen Methoden zur Wirkungsmessung sinnvoll anwenden.

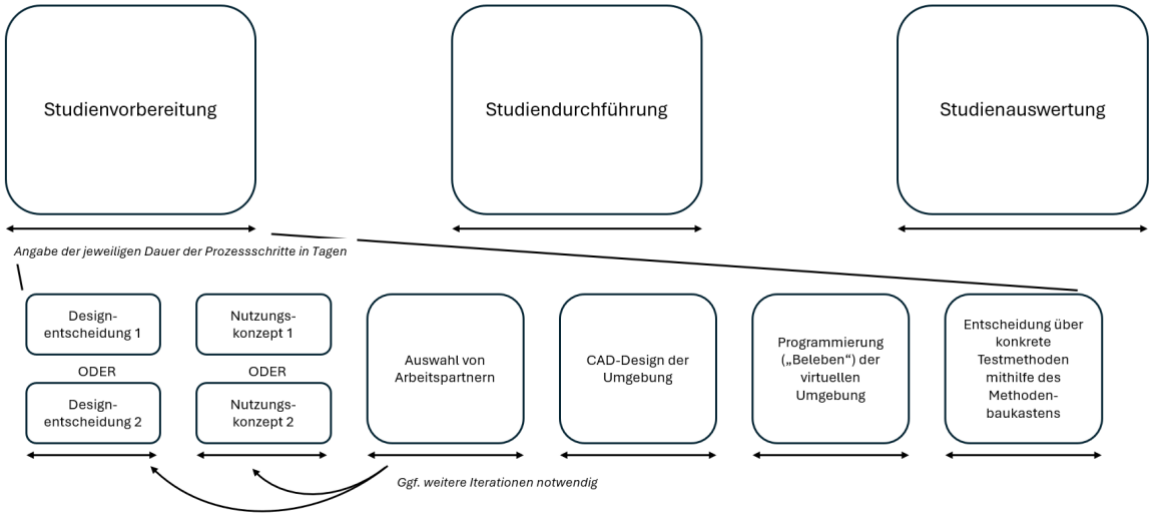


Abbildung 37: Beispielhafter Ablauf einer Studienvorbereitung (eigene Darstellung, 2025)

In Abbildung 37 ist eine beispielhafte Vorbereitung einer Studie dargestellt. Zunächst werden die Design- und Nutzungskonzepte entwickelt, die später getestet werden sollen. Auf Basis dieser Konzepte können geeignete Projektpartner identifiziert und ausgewählt werden. Im nächsten Schritt werden die entworfenen Umgebungen per CAD in ein begehbares 3D-Modell übertragen. Um das Nutzungskonzept realitätsnah testen zu können, muss die virtuelle Umgebung anschließend „belebt" werden – etwa durch die Integration typischer Nutzungsszenarien. Anhand der erwarteten Ergebnisse lassen sich dann geeignete

Testmethoden aus dem zuvor beschriebenen Methodenbaukasten auswählen. Die eigentliche Durchführung der Studie erfolgt schließlich gemäß den Ausführungen in Kapitel 5.3.2.

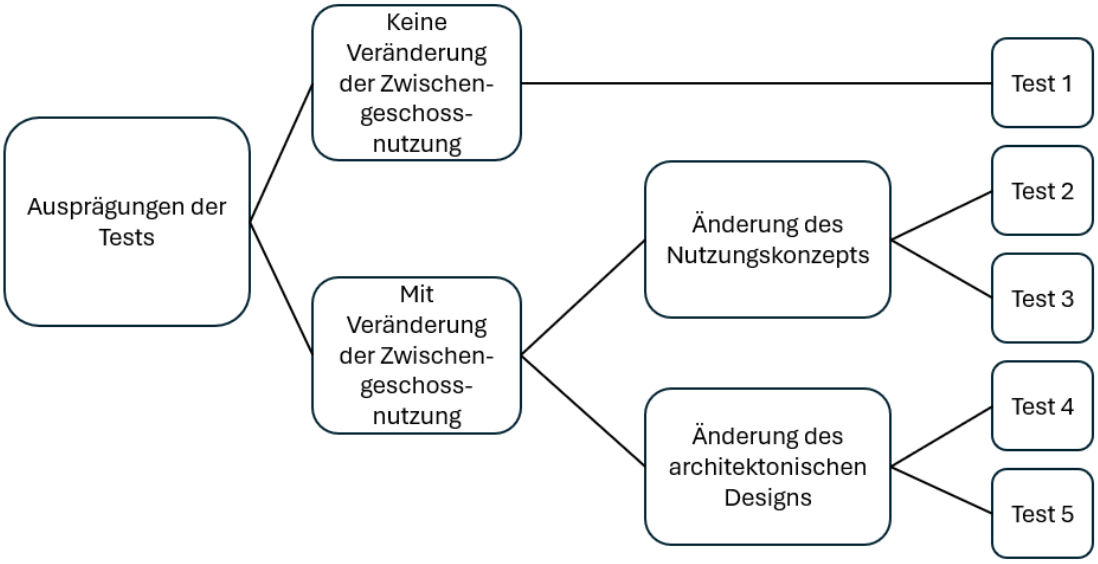


Abbildung 38: Mögliche Testausprägungen (eigene Darstellung, 2025 in Anlehnung an Ergan et al., 2018)

Abbildung 38 zeigt verschiedene Testvarianten im Vergleich. Die erste Variante – ohne veränderte Zwischengeschossnutzung, bspw. mit klassischem single tenant, dient als Referenzgruppe und ermöglicht so eine Bewertung des gesellschaftlichen Mehrwerts, der durch die Zwischengeschossnutzung erst entsteht. Eine evidenzbasierte Analyse des gesellschaftlichen Nutzens liefert mehrere Vorteile: Ein verbessertes Nutzererlebnis steigert die Zufriedenheit der Besucher und wirkt sich positiv auf die (soziale) Qualität im Quartier aus – ein zentraler Aspekt der ESG-Kriterien. Steigende Zufriedenheit der Besucher kann die Besucherfrequenz erhöhen, wodurch das Innenstadtquartier wiederum für Mieter und neue Konzepte attraktiver wird. Damit setzt sich ein positiver Kreislauf in Gang, der wirtschaftliche Vorteile für Projektentwickler und Umfeld generiert (Valero, 2024). Die weiteren Testgruppen untersuchen unterschiedliche Kombinationen aus Gestaltung und Nutzungskonzepten. Jede Ausprägung wird isoliert betrachtet, um jene Varianten zu identifizieren, die die höchstmögliche Förderung des sozialen Wohlbefindens und Nutzens generieren. Dadurch lassen sich Raumstrukturen, Anordnungen und Konzepte systematisch und belastbar vergleichen. Die Ergebnisse der Studie können als fundierte Grundlage für die S-Komponente im ESG-Reporting dienen. Projektentwickler, die soziale Wirkungen nachweislich erfassen und darstellen, verschaffen sich dadurch einen realen Wettbewerbsvorteil. Die belastbare Messung von Akzeptanz und gesellschaftlicher Wirkung erhöht zudem die Planungssicherheit – ein entscheidender Faktor für den Projekterfolg, insbesondere bei Mixed-Use-Konzepten, die

bislang häufig an mangelnder Finanzierung scheitern (DeLisle & Grissom, 2013). Zudem stärkt eine solche evidenzbasierte Herangehensweise die Position in Verhandlungen mit Stakeholdern. Kommunen, die dem Gemeinwohl verpflichtet sind, erhalten damit einen transparenten Nachweis über den gesellschaftlichen Nutzen der Entwicklung – ein Argument, das sowohl politische als auch planerische Prozesse nachhaltig erleichtern kann.

6 Fazit und Ausblick

Die vorliegende Untersuchung hat Methoden zur Erfassung menschlicher Wahrnehmungen und Verhaltensweisen im städtischen Kontext identifiziert, ihre theoretische Fundierung dargelegt und ihre Übertragbarkeit auf die Entwicklung zukunftsfähiger Innenstädte überprüft. Auf Basis kognitionswissenschaftlicher Grundlagen wurden Verfahren aus der Neurowissenschaften und der Physiologie als vielversprechende Ergänzungen zu etablierten, primär subjektivistischen Erhebungsansätzen (z. B. Befragungen, Interviews) herausgearbeitet. Diese Methoden können dazu beitragen, die bislang nur begrenzt nachvollziehbare Schnittstelle zwischen innerstädtischer Umgebung, deren Immobilien und menschlicher Wahrnehmung bzw. Reaktion empirisch fundierter zu erfassen. Die daraus resultierenden, objektiven Daten können in Zukunft Planungsentscheidungen maßgeblich unterstützen. Im Rahmen der Untersuchung wurde der mögliche Einsatz dieser Methoden sowie ihr potenzieller Mehrwert anhand zweier zentraler Fragestellungen in der Projektentwicklung näher betrachtet. Allerdings ist die Einbindung dieser Messverfahren in immobilienwirtschaftliche Prozesse nicht als fakultative Ergänzung, sondern als integraler Bestandteil moderner Projektentwicklungen zu verstehen. Nur durch eine systematische Anwendung der vorgestellten Instrumente – etwa EEG, fNIRS, EMG, Hautleitfähigkeitssensorik oder Soundscape-Analysen – können Akteurinnen und Akteure im Immobiliensektor ihre Entscheidungen auf empirisch gesicherte Befunde stützen. Eine solch datenbasierte Herangehensweise bildet die Grundlage für eine stärkere Fokussierung auf menschliche Bedürfnisse, Wahrnehmungen und Verhaltensmuster. Damit wird es möglich, Innenstädte und dort realisierte Projekte konsequent am Menschen auszurichten, anstatt Planungsprozesse überwiegend auf historische Erfahrungen, Intuition oder konservative Gestaltungsmuster zu gründen. Derartige, menschengerechte Entwicklungskonzepte finden ihre Entsprechung in jüngeren Ansätzen wie jenen von Thomas Heatherwick („Humanise: A Maker's Guide to Building Our World", 2024). Diese fordern, gebaute Umwelten vorrangig aus der Perspektive ihrer Nutzerinnen und Nutzer zu denken, um sie sozial, kulturell und ökonomisch widerstandsfähiger zu gestalten. Die vorgestellten Messmethoden bieten ein wertvolles Instrumentarium, um diese Forderungen in der Praxis umzusetzen. Dennoch sind die hier erörterten Methoden keine umfassende Lösung für alle Fragestellungen, sondern erweitern die vorhandenen Ansätze um eine weitere Entscheidungsgrundlage. Je nach Untersuchungsgegenstand (etwa Materialität, Personenanzahl oder akustische Qualität) bedarf es einer sorgfältigen, kontextbezogenen Auswahl sowie einer klaren Priorisierung der Verfahren.

Insgesamt liefert diese Arbeit Impulse für eine stärker empirisch fundierte, menschengerechte und damit langfristig tragfähige Weiterentwicklung von Innenstädten. Die

Integration der aufgezeigten Methoden in die immobilienwirtschaftliche Praxis ist hierbei ein entscheidender Schritt, um Städte wieder vermehrt zu lebensnahen, belastbaren und an den Bedürfnissen ihrer Bevölkerung ausgerichteten Räumen zu machen.

Literaturverzeichnis

9th IEEE International Conference on Cognitive Informatics (ICCI'10) (2010). 2010 9th IEEE International Conference on Cognitive Informatics (ICCI). Beijing, China, 07.07.2010 - 09.07.2010: IEEE.

Abreu, Rodolfo; Leal, Alberto; Figueiredo, Patrícia (2018): EEG-Informed fMRI: A Review of Data Analysis Methods. In: *Frontiers in human neuroscience* 12, S. 29. DOI: 10.3389/fnhum.2018.00029.

Adli, Mazda (2024): AG Neurourbanistik. Online verfügbar unter https://psychiatrie-psychotherapie.charite.de/forschung/affektive_erkrankungen/ag_neurourbanistik/, zuletzt geprüft am 17.09.2024.

Aggarwal, J. K.; Cai, Q. (1997): Human motion analysis: a review. In: Proceedings IEEE Nonrigid and Articulated Motion Workshop. IEEE Nonrigid and Articulated Motion Workshop. San Juan, Puerto Rico, 16 June 1997: IEEE Comput. Soc, S. 90–102.

Alajmi, Nouf; Kanjo, Eiman; El-Mawass, Nour; Chamberlain, A. (2013): Shopmobia: An Emotion-Based Shop Rating System. In: *Conference: acii13 Adjunct at http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2544842.2544862*.

Ala-Matila, Sanna; Heinonen, Jukka; Junnila, Seppo; Saarsalmi, Perttu (2017): Spatial nature of urban well-being. In: *Regional Studies* 52 (7), S. 959–973. DOI: 10.1080/00343404.2017.1360485.

AL-Ayash, Aseel; Kane, Robert T.; Smith, Dianne; Green-Armytage, Paul (2016): The influence of color on student emotion, heart rate, and performance in learning environments. In: *Color Research & Application* 41 (2), S. 196–205. DOI: 10.1002/col.21949.

Alexandris, K.; Kouthouris, C.; Meligdis, Andreas (2006): Increasing customers' loyalty in a skiing resort. In: *International Journal of Contemporary Hospitality Management* 18 (5), S. 414–425. DOI: 10.1108/09596110610673547.

Al-Husain, Luluah; Kanjo, Eiman; Chamberlain, Alan (2013): Sense of space: mapping physiological emotion response in urban space. In: *UbiComp '13 Adjunct: Proceedings of the 2013 ACM conference on Pervasive and ubiquitous computing adjunct publication*, S. 1321–1324. DOI: 10.1145/2494091.2499213.

Ancora, Leonardo A.; Blanco-Mora, Diego Andrés; Alves, Inês; Bonifácio, Ana; Morgado, Paulo; Miranda, Bruno (2022): Cities and neuroscience research: A systematic literature review. In: *Frontiers in psychiatry* 13, S. 983352. DOI: 10.3389/fpsyt.2022.983352.

Anderson, Allison P.; Mayer, Michael D.; Fellows, Abigail M.; Cowan, Devin R.; Hegel, Mark T.; Buckey, Jay C. (2017): Relaxation with Immersive Natural Scenes Presented Using Virtual Reality. In: *Aerospace medicine and human performance* 88 (6), S. 520–526. DOI: 10.3357/AMHP.4747.2017.

Andreani, Stefano; Sayegh, Allen (2017): Augmented Urban Experiences: Technologically Enhanced Design Research Methods for Revealing Hidden Qualities of the Built Environment. In: *Conference: Acadia 2017 Disciplines & Disruption*. DOI: 10.52842/conf.acadia.2017.082.

ANOVA Institute for Regenerative Medicine (2024): Diagnostic Imaging - MRI, CT, Ultrasound. Online verfügbar unter https://anova-irm.com/en/diagnostics/diagnostic-work-up, zuletzt geprüft am 18.09.2024.

Atkinson, A.; Shaffir, W. (1998): Standards for Field Research in Management Accounting. In: *Journal of Management Accounting Research*. Online verfügbar unter Atkinson, Anthony Alan and Shaffir, W., Standards for Field Research in Management Accounting. Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=137268.

Auerswald, Tina; Hendker, Anna; Ratz, Tiara; Lippke, Sonia; Pischke, Claudia R.; Peters, Manuela et al. (2022): Impact of Activity Tracker Usage in Combination with a Physical Activity Intervention on Physical and Cognitive Parameters in Healthy Adults Aged 60+: A Randomized Controlled Trial. In: *IJERPH* 19 (7). DOI: 10.3390/ijerph19073785.

Axis Integrated Mental Health (2024): TMS Therapy Costs. Online verfügbar unter https://www.axismh.com/content/tms-therapy-costs, zuletzt geprüft am 18.09.2024.

Bahillo, Alfonso; Goličnik Marušić, Barbara; Perallos, Asier (2015): A Mobile Application as an Unobtrusive Tool for Behavioural Mapping in Public Spaces. In: Juan M. García-Chamizo, Giancarlo Fortino und Sergio F. Ochoa (Hg.): Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence. Sensing, Processing, and Using Environmental Information, Bd. 9454. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Computer Science), S. 13–25.

Banaei, Maryam; Hatami, Javad; Yazdanfar, Abbas; Gramann, Klaus (2017): Walking through Architectural Spaces: The Impact of Interior Forms on Human Brain Dynamics. In: *Frontiers in human neuroscience* 11, S. 477. DOI: 10.3389/fnhum.2017.00477.

Barceló, Francisco (2001): Does the Wisconsin Card Sorting Test Measure Prefontral Function? In: *Span. J. Psychol.* 4 (1), S. 79–100. DOI: 10.1017/S1138741600005680.

Basil, Michael (2011): Use of photography and video in observational research. In: *Qualitative Market Research: An International Journal* 14 (3), S. 246–257. DOI: 10.1108/13522751111137488.

Bateson, Anthony D.; Baseler, Heidi A.; Paulson, Kevin S.; Ahmed, Fayyaz; Asghar, Aziz U. R. (2017): Categorisation of Mobile EEG: A Researcher's Perspective. In: *BioMed research international* 2017, S. 5496196. DOI: 10.1155/2017/5496196.

Bauer, Christopher E.; Brefczynski-Lewis, Julie; Marano, Gary; Mandich, Mary-Beth; Stolin, Alexander; Martone, Peter et al. (2016): Concept of an upright wearable positron emission tomography imager in humans. In: *Brain and behavior* 6 (9), e00530. DOI: 10.1002/brb3.530.

Bauknecht, Philippe (2024): Emotionaler Stroop-Test - Eine geeignete Methode, um Emotionsregulation und Impulsivität zu messen? Masterarbeit. Karl-Franzens-Universität, Graz. Institut für Psychologie der Fakultät für Naturwissenschaften. Online verfügbar unter https://unipub.uni-graz.at/obvugrhs/content/titleinfo/9739938/full.pdf.

Bäumler, Günther (1985): Farbe-Wort-Interferenztest. Online verfügbar unter https://www.testzentrale.de/shop/farbe-wort-interferenztest.html, zuletzt geprüft am 19.09.2024.

Belkouri, Daria; Laing, Richard (2024): Walking through the abstract[ed] city and co-creating urban space. In: *Applied Mobilities* 9 (1), S. 63–83. DOI: 10.1080/23800127.2024.2309742.

Bennetts, Helen; Soebarto, Veronica; Oakley, Susan; Babie, Paul (2017): Feeling safe and comfortable in the urban environment. In: *Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability* 10 (4), S. 401–421. DOI: 10.1080/17549175.2017.1310746.

Berg, Kim (2020): Die gesunde Stadt. Online verfügbar unter https://www.deutschland.de/de/topic/umwelt/gesunde-staedte-das-ziel-des-forschungsbereichs-neurourbanismus, zuletzt aktualisiert am 02.10.2020, zuletzt geprüft am 17.09.204.

Berleant, Arnold (1998): Preview This Book Living in the Landscape. Toward an Aesthetics of Environment: University Press of Kansas.

Bishop, Kate; Marshall, Nancy; Rahmat, Homa; Thompson, Susan; Steinmetz-Weiss, Christine; Corkery, Linda et al. (2024): Behavior Mapping and Its Application in Smart Social Spaces. In: *Encyclopedia* 4 (1), S. 171–185. DOI: 10.3390/encyclopedia4010015.

Blennerhassett, Jannette Maree; Borschmann, Karen Nancy; Lipson-Smith, Ruby Adelaide; Bernhardt, Julie (2018): Behavioral Mapping of Patient Activity to Explore the Built Environment During Rehabilitation. In: *HERD* 11 (3), S. 109–123. DOI: 10.1177/1937586718758444.

Blewitt, Geoffrey (1997): Basics of the GPS Technique: Observation Equations. In: *Department of Geomatics, University of Newcastle, in: Textbook Geodetic Applications of GPS, published by the Swedish Land Survey*.

Block Imaging (2024): PET/CT Scanner Price Guide. Online verfügbar unter https://www.blockimaging.com/bid/68875/how-much-does-a-pet-ct-scanner-cost, zuletzt geprüft am 17.09.2024.

Boere, Katherine; Hecker, Kent; Krigolson, Olave E. (2024): Validation of a mobile fNIRS device for measuring working memory load in the prefrontal cortex. In: *International Journal of Psychophysiology* 195, S. 112275. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2023.112275.

Bohil, Corey J.; Alicea, Bradly; Biocca, Frank A. (2011): Virtual reality in neuroscience research and therapy. In: *Nature reviews. Neuroscience* 12 (12), S. 752–762. DOI: 10.1038/nrn3122.

Boyu, Zhang; Zhuxiu, Liao; Hongen, Liao (2017): Visible forceps manipulator with novel linkage bending mechanism for neurosurgery. In: *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference* 2017, S. 4329–4332. DOI: 10.1109/EMBC.2017.8037814.

Brambilla, Cristina; Pirovano, Ileana; Mira, Robert Mihai; Rizzo, Giovanna; Scano, Alessandro; Mastropietro, Alfonso (2021): Combined Use of EMG and EEG Techniques for Neuromotor Assessment in Rehabilitative Applications: A Systematic Review. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 21 (21). DOI: 10.3390/s21217014.

Braun, Christoph (2007): Magnetoenzephalografie: Eine Methode zur Untersuchung von Hirnfunktionen in der Neurochirurgie. In: *Zeitschrift fur medizinische Physik* 17 (4), S. 280–287. DOI: 10.1016/j.zemedi.2007.09.005.

Brunner, Lisa Marie; Hillnhütter, Helge; Aalto, Pasi; Steinert, Martin; Dybvik, Henrikke (2023): Measuring the Impact of Walking Environments on Brain Activation: Results from an fNIRS Pilot Study.

Camargo, Araceli; Artus, Joshua; Spiers, Hugo (2021): Neuroscience. A Playbook for Placemakers. University College London: Connected Places Catapult. Online verfügbar unter https://neuro-architectology.com/neuroscience-.

Carter, Benjamin T.; Luke, Steven G. (2020): Best practices in Eyetracking research. In: *International journal of psychophysiology : official journal of the International Organization of Psychophysiology* 155, S. 49–62. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2020.05.010.

Cascio, Carissa J.; Gerig, Guido; Piven, Joseph (2007): Diffusion tensor imaging: Application to the study of the developing brain. In: *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry* 46 (2), S. 213–223. DOI: 10.1097/01.chi.0000246064.93200.e8.

Casson, Alexander J.; Trimble, Eleanor V. (2018): Enabling Free Movement EEG Tasks by Eye Fixation and Gyroscope Motion Correction: EEG Effects of Color Priming in Dress Shopping. In: *IEEE Access* 6, S. 62975–62987. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2877158.

Cha, Seung Hyun; Zhang, Shaojie; Kim, Tae Wan (2020): Effects of Interior Color Schemes on Emotion, Task Performance, and Heart Rate in Immersive Virtual Environments. In: *Journal of Interior Design* 45 (4), S. 51–65. DOI: 10.1111/joid.12179.

Chow, Clara K.; Corsi, Daniel J.; Lock, Karen; Madhavan, Manisha; Mackie, Pam; Li, Wei et al. (2014): A novel method to evaluate the community built environment using photographs--Environmental Profile of a Community Health (EPOCH) photo neighbourhood evaluation tool. In: *PloS one* 9 (11), e110042. DOI: 10.1371/journal.pone.0110042.

Cinnamon, Jonathan; Jahiu, Lindi (2023): 360-degree video for virtual place-based research: A review and research agenda. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 106, S. 102044. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2023.102044.

CityAR (2024): CityApp. Online verfügbar unter https://cityar.de/, zuletzt geprüft am 17.09.2024.

Cleveland Clinic (2022): PET Scan. Online verfügbar unter https://my.clevelandclinic.org/health/diagnostics/10123-pet-scan, zuletzt aktualisiert am 19.10.2022, zuletzt geprüft am 17.09.2024.

Cleveland Clinic (2023): EMG (Electromyography). Online verfügbar unter https://my.clevelandclinic.org/health/diagnostics/4825-emg-electromyography, zuletzt aktualisiert am 02.10.2023, zuletzt geprüft am 19.09.2024.

Coensel De, Bert; Bockstael, Annelies; Dekoninck, Luc; Botteldooren, Dick; Schulte-Fortkamp, Brigitte; Kang, Jian; Nilsson, Mats E. (2010): The Soundscape Approach for Early Stage Urban Planning: A Case Study. In: *Inter Noise Conference* June 13-16 (Lisbon, Portugal).

Cosco, Nilda G.; Moore, Robin C.; Islam, Mohammed Z. (2010): Behavior mapping: a method for linking preschool physical activity and outdoor design. In: *Medicine and science in sports and exercise* 42 (3), S. 513–519. DOI: 10.1249/MSS.0b013e3181cea27a.

Da Silva, Isac Alencar Rodrigues; Santos, Elder Cleiton Barreto Francisco dos; Carvalho, Elton Moreira; Dantas, Daniel Oliveira (2018): Low cost hardware and software platform for multichannel surface electromyography. In: 2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). 2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Natal, 25.06.2018 - 28.06.2018: IEEE, S. 1114–1119.

Darko, Amos; Chan, Albert Ping-Chuen (2021): Applying science mapping in built environment research. In: Emmanuel Manu und Julius Akotia (Hg.): Secondary Research Methods in the Built Environment. Abingdon, Oxon, New York, NY: Routledge/Taylor & Francis Group, 2021.: Routledge, S. 117–132.

Davidson, Pavel; Piche, Robert (2017): A Survey of Selected Indoor Positioning Methods for Smartphones. In: *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 19 (2), S. 1347–1370. DOI: 10.1109/COMST.2016.2637663.

Dawson, Michael E.; Schell, Anne M.; Filion, Diane L.; Berntson, Gary G. (2007): The Electrodermal System. In: John T. Cacioppo, Louis G. Tassinary und Gary Berntson (Hg.): Handbook of Psychophysiology. Cambridge: Cambridge University Press, S. 157–181.

Del Fuentes Toro, Sergio; Wei, Yuyang; Olmeda, Ester; Ren, Lei; Guowu, Wei; Díaz, Vicente (2019): Validation of a Low-Cost Electromyography (EMG) System via a Commercial and Accurate EMG Device: Pilot Study. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 19 (23). DOI: 10.3390/s19235214.

Dengler, Julia; Deck, Benjamin L.; Stoll, Harrison; Fernandez-Nunez, Guadalupe; Kelkar, Apoorva S.; Rich, Ryan R. et al. (2024): Enhancing cognitive control with transcranial magnetic stimulation in subject-specific frontoparietal networks. In: *Cortex; a journal*

devoted to the study of the nervous system and behavior 172, S. 141–158. DOI: 10.1016/j.cortex.2023.11.020.

Diaconu, Mădălina (2011): City Walks and Tactile Experiences. In: *Contemporary Aesthetics* 9 (9), Article 14.

Diederichs, C. (1994): Grundlagen der Projektentwicklung. In: *Bauwirtschaft* (11), S. 43–49.

Discover (2019): Mobile MEG: Will New Technology Change Neuroscience? Online verfügbar unter https://www.discovermagazine.com/mind/mobile-meg-will-new-technology-change-neuroscience, zuletzt aktualisiert am 17.05.2019, zuletzt geprüft am 23.0.2024.

Dorbala, Sharmila; Ananthasubramaniam, Karthik; Armstrong, Ian S.; Chareonthaitawee, Panithaya; DePuey, E. Gordon; Einstein, Andrew J. et al. (2018): Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT) Myocardial Perfusion Imaging Guidelines: Instrumentation, Acquisition, Processing, and Interpretation. In: *Journal of nuclear cardiology : official publication of the American Society of Nuclear Cardiology* 25 (5), S. 1784–1846. DOI: 10.1007/s12350-018-1283-y.

Dorsch (2024): Nahinfrarotspektroskopie, funktionelle (fNIRS) https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/nahinfrarotspektroskopie-funktionelle-fnirs. Online verfügbar unter https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/nahinfrarotspektroskopie-funktionelle-fnirs, zuletzt geprüft am 19.09.2024.

Du Toit, Jacques L.; Mouton, Johann (2013): A typology of designs for social research in the built environment. In: *International Journal of Social Research Methodology* 16 (2), S. 125–139. DOI: 10.1080/13645579.2012.657013.

Ebner-Priemer, U. W.; Reichert, M.; Tost, H.; Meyer-Lindenberg, A. (2019): Wearables zum kontextgesteuerten Assessment in der Psychiatrie. In: *Der Nervenarzt* 90 (12), S. 1207–1214. DOI: 10.1007/s00115-019-00815-w.

Ekstrom, Arne; Viskontas, Indre; Kahana, Michael; Jacobs, Josh; Upchurch, Kristen; Bookheimer, Susan; Fried, Itzhak (2007): Contrasting roles of neural firing rate and local field Potenzials in human memory. In: *Hippocampus* 17 (8), S. 606–617. DOI: 10.1002/hipo.20300.

El Asmar, Paul G. (2021): Contextualizing benefits and limitations reported for augmented reality in construction research. In: *Journal of Information Technology in Construction* (26), S. 720–738. DOI: 10.36680/j.itcon.2021.039.

Eling, Paul; Derckx, Kristianne; Maes, Roald (2008): On the historical and conceptual background of the Wisconsin Card Sorting Test. In: *Brain and cognition* 67 (3), S. 247–253. DOI: 10.1016/j.bandc.2008.01.006.

Engelniederhammer, Anna; Papastefanou, Georgios; Xiang, Luyao (2019): Crowding density in urban environment and its effects on emotional responding of pedestrians: Using wearable device technology with sensors capturing proximity and psychophysiological emotion responses while walking in the street. In: *Journal of Human Behavior in the Social Environment* 29 (5), S. 630–646. DOI: 10.1080/10911359.2019.1579149.

Ergan, Semiha; Radwan, Ahmed; Zou, Zhengbo; Tseng, Hua-an; Han, Xue (2019): Quantifying Human Experience in Architectural Spaces with Integrated Virtual Reality and Body Sensor Networks. In: *J. Comput. Civ. Eng.* 33 (2), Artikel 04018062. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000812.

Evans, Jon C. (1992): Imminence and immanence : embodied meaning in architectural experience. Online verfügbar unter https://www.semanticscholar.org/paper/Imminence-and-immanence-%3A-embodied-meaning-inEvans/21b5876a6f06977b403f16ec7e4e7ef0dd021b42, zuletzt geprüft am 17.09.2024.

Feldstein, S. N.; Keller, F. R.; Portman, R. E.; Durham, R. L.; Klebe, K. J.; Davis, H. P. (1999): A comparison of computerized and standard versions of the Wisconsin Card Sorting Test. In: *The Clinical neuropsychologist* 13 (3), S. 303–313. DOI: 10.1076/clin.13.3.303.1744.

Florescu, Stefan; Nistor, Diana E. (2020): Assessing the Emotional Impact of Cognitive Affordance in the Built Environment through Augmented Reality. In: *Symposium on Simulations in Architecture + Urban Design (SimAUD)*, Mai 25-27. DOI: 10.5555/3465085.3465141.

Fortenberry (2019): *Research Notes*: Digital Documentation in Vernacular Architecture Studies. In: *Buildings & Landscapes: Journal of the Vernacular Architecture Forum* 26 (2), S. 98. DOI: 10.5749/buildland.26.2.0098.

Funke, Gregory; Greenlee, Eric; Carter, Martha; Dukes, Allen; Brown, Rebecca; Menke, Lauren (2016): Which eye tracker is right for your research? Performance evaluation of several cost variant eye trackers. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 2016 Annual Meeting*, S. 1240–1244.

Garau, Chiara; Pavan, Valentina M. (2018): Evaluating Urban Quality: Indicators and Assessment Tools for Smart Sustainable Cities. In: *Sustainability* 10 (3), S. 575. DOI: 10.3390/su10030575.

Gardner, Howard (1989): Dem Denken auf der Spur. Der Weg der Kognitionswissenschaft. Stuttgart: Klett-Cotta.

Garnett, Ryan; Adams, Matthew (2018): LiDAR—A Technology to Assist with Smart Cities and Climate Change Resilience: A Case Study in an Urban Metropolis. In: *IJGI* 7 (5), S. 161. DOI: 10.3390/ijgi7050161.

Geddes, L. A.; Roeder, R. (2003): Criteria for the selection of materials for implanted electrodes. In: *Annals of biomedical engineering* 31 (7), S. 879–890. DOI: 10.1114/1.1581292.

Giorgi, Amedeo (2009): The descriptive phenomenological method in psychology: A modified Husserlian approach.

Giray Küçük, S.; Yüceer, Hande (2022): Neuroscience and the Cities: Neurourbanism. In: *Journal of Science, Part B* 10 (3), S. 287–301.

Görgül, Ercument; Yıldız Özkan, Dilek (2024): Neuro-Urbanism: Measurement of the Street Enclosure and its Influence on Human Physiology Through Wearable Sensors. In: *DepArch*, Artikel 1. DOI: 10.55755/DepArch.2024.27.

Grant, David A.; Berg, Esta A. (2024): Wisconsin Card Sorting Test®. Online verfügbar unter https://www.testzentrale.de/shop/wisconsin-card-sorting-testr.html, zuletzt geprüft am 19.09.2024.

Grzyb, Tomasz; Dolinski, Dariusz (2021): The Field Study in Social Psychology. London: Routledge.

Hall, Elizabeth A. H. (1995): Biosensoren. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Hammoud, Ryan; Tognin, Stefania; Smythe, Michael; Gibbons, Johanna; Davidson, Neil; Bakolis, Ioannis; Mechelli, Andrea (2024): Smartphone-based ecological momentary assessment reveals an incremental association between natural diversity and mental wellbeing. In: *Scientific reports* 14 (1), S. 7051. DOI: 10.1038/s41598-024-55940-7.

Harvey, Chester (2024): Sensing walkability? Opportunities and limitations of electrodermal activity as an indicator of walkable urban environments. In: *Planning Practice & Research*, S. 1–20. DOI: 10.1080/02697459.2024.2315398.

Heatherwick, Thomas (2023): Humanize. A maker's guide to designing our cities. New York: Scribner.

Herholz, Karl; Heiss, W-D (2004): Positron emission tomography in clinical neurology. In: *Molecular imaging and biology* 6 (4), S. 239–269. DOI: 10.1016/j.mibio.2004.05.002/.

Herreras, Oscar (2016): Local Field Potenzials: Myths and Misunderstandings. In: *Frontiers in neural circuits* 10, S. 101. DOI: 10.3389/fncir.2016.00101.

Herssens, Jasmien; Heylighen, Ann (2008): Haptics and Vision in Architecture. In: *Raymond, Lucas; Gordon, Mair (Eds.) Proceedings Sensory Urbanism Proceedings*, S. 102–112. Online verfügbar unter http://hdl.handle.net/1942/13900, zuletzt geprüft am 17.09.2024.

Heydarian, Arsalan; Carneiro, Joao P.; Gerber, David; Becerik-Gerber, BurcinM; Hayes, Timothy; Wood, Wendy (2015): Immersive virtual environments versus physical built environments: a benchmarking study for building design and user-built environment explorations. In: *Autom. Constr* 54, S. 116–126. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.03.020.

Hiller, Bill (2014): Spatial analysis and cultural information: the need for theory as well as method in space syntax analysis. In: Eleftheria Paliou, Undine Lieberwirth und Silvia Polla (Hg.): Spatial analysis and social spaces: De Gruyter, S. 19–48.

Hinrichs, Hermann (2012): Magnetenzephalografie (MEG). In: Stephan Zschocke und Hans-Christian Hansen (Hg.): Klinische Elektroenzephalografie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 515–522.

Hollander, Justin B.; Levering, Alexandra Purdy; Lynch, Lauren; Foster, Veronica; Perlo, Sarah; Jacob, Robert J. K. et al. (2021): Cognitive responses to urban environments: behavioral responses in lab and field conditions. In: *Urban Des Int* 26 (3), S. 256–271. DOI: 10.1057/s41289-020-00122-w.

Hölscher, Christoph; Brösamle, Martin; Vrachliotis, Georg (2012): Challenges in Multilevel Wayfinding: A Case Study with the Space Syntax Technique. In: *Environ. Plann. B* 39 (1), S. 63–82. DOI: 10.1068/b34050t.

Hu, Ming; Roberts, Jennifer (2020): Built Environment Evaluation in Virtual Reality Environments—A Cognitive Neuroscience Approach. In: *Urban Sci.* 4 (4), S. 48. DOI: 10.3390/urbansci4040048.

Hystreet (2024): Passantenfrequenzen. Online verfügbar unter https://hystreet.com/, zuletzt geprüft am 22.09.2024.

IBM (2024): Was ist LiDAR? Online verfügbar unter https://www.ibm.com/de-de/topics/lidar, zuletzt geprüft am 20.09.2024.

IBS Hospital (2024): How Long Does Deep Brain Stimulation Surgery Take? Online verfügbar unter https://www.ibshospitals.com/blog/how-long-does-deep-brain-stimulation-surgery-take, zuletzt aktualisiert am 01.08.2024, zuletzt geprüft am 17.09.2024.

Jang, Ju. Y.; Baek, Eunsoo; Yoon, So-Yeon, Choo, Ho J. (2018): Store Design: Visual Complexity and Consumer Responses. In: *International Journal of Design* 12 (2), S. 105–118.

Kalisch, Tobias; Kattenstroth, Jan-Christoph; Kowalewski, Rebecca; Tegenthoff, Martin; Dinse, Hubert R. (2012): Cognitive and tactile factors affecting human haptic performance in later life. In: *PloS one* 7 (1), e30420. DOI: 10.1371/journal.pone.0030420.

Kancherlapalli, Jacob (2023): The Cost of PET Scans for Treatment Planning Efficiency. Online verfügbar unter https://www.mobilecardiacpet.com/blog/the-cost-of-pet-scans-for-treatment-planning-efficiency/, zuletzt aktualisiert am 07.04.2023, zuletzt geprüft am 17.09.2024.

Kar, Zinia; Sarkar, Amitava (2017): Exploring the role of Environment-Behavior Studies (EBS) inResidential Architecture- From Literature Review to Field Study. In: *International Research Journal of Engineering and Technology*, S. 409–418.

Karandinou, Anastasia (2018): Data, Architecture and the Experience of Place. New York : Routledge, 2019.: Routledge.

Karimi, Kayvan (2012): A configurational approach to analytical urban design: 'Space syntax' methodology. In: *Urban Des Int* 17 (4), S. 297–318. DOI: 10.1057/udi.2012.19.

Karuppaiah, Gopi; Lee, Min-Ho; Bhansali, Shekhar; Manickam, Pandiaraj (2023): Electrochemical sensors for cortisol detection: Principles, designs, fabrication, and characterisation. In: *Biosensors & bioelectronics* 239, S. 115600. DOI: 10.1016/j.bios.2023.115600.

Kennedy, Daniel P.; Adolphs, Ralph (2011): Social neuroscience: Stress and the city. In: *Nature* 474 (7352), S. 452–453. DOI: 10.1038/474452a.

Kerstetter, Deborah; Shen, Xiangyou; Yi, Xiaoli; Pan, Bing; Zhang, Gaojun; Li, Rui et al. (2022): Sources of Happiness: A Mixed Methods Phenomenological Study of Factors Affecting Residents' Subjective Wellbeing in Shenzhen, China. In: *Psychological reports* 125 (1), S. 167–199. DOI: 10.1177/0033294120971742.

Khalil, Magdy M.; Tremoleda, Jordi L.; Bayomy, Tamer B.; Gsell, Willy (2011): Molecular SPECT Imaging: An Overview. In: *International journal of molecular imaging* 2011, S. 796025. DOI: 10.1155/2011/796025.

Kim, Jeongmin; Kim, Nayeon (2022): Quantifying Emotions in Architectural Environments Using Biometrics. In: *Applied Sciences* 12 (19), S. 9998. DOI: 10.3390/app12199998.

Kim, M. J.; Wang, X.; Love, P. E.; Li, H.; Kang, S.-C. (2013): Virtual reality for the built environment: a critical review of recent advances. In: *Journal of Information Technology in Construction* 18, S. 279–305.

Kim, Tae-Hoon; Jeong, Gwang-Woo; Baek, Han-Su; Kim, Gwang-Won; Sundaram, Thirunavukkarasu; Kang, Heoung-Keun et al. (2010): Human brain activation in response to visual stimulation with rural and urban scenery pictures: A functional magnetic resonance imaging study. In: *Science of The Total Environment* 408 (12), S. 2600–2607. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.02.025.

Kluth, Karsten; Steinhilber, Benjamin; Nesseler, Thomas (2013): Oberflächen-Elektromyografie in der Arbeitsmedizin, Arbeitsphysiologie und Arbeitswissenschaft. In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 67 (2), S. 113–128. DOI: 10.1007/BF03373911.

Kondo, Chisuzu; Saito, Chiaki; Deguchi, Ayaka; Hirayama, Miki; Acar, Adam (2010): Social Conformity and Response Bias Revisited: The Influence of "Others" on Japanese Respondents. In: *Human Affairs* 20 (4), S. 356–363. DOI: 10.2478/v10023-010-0036-6.

Kopton, Isabella M.; Kenning, Peter (2014): Near-infrared spectroscopy (NIRS) as a new tool for neuroeconomic research. In: *Frontiers in human neuroscience* 8, S. 549. DOI: 10.3389/fnhum.2014.00549.

Kotradyova, Veronika; Vavrinsky, Erik; Kalinakova, Barbora; Petro, Dominik; Jansakova, Katarina; Boles, Martin; Svobodova, Helena (2019): Wood and Its Impact on Humans and Environment Quality in Health Care Facilities. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16 (18). DOI: 10.3390/ijerph16183496.

Krugliak, Alexandra; Clarke, Alex (2022): Towards real-world neuroscience using mobile EEG and augmented reality. In: *Scientific reports* 12 (1), S. 2291. DOI: 10.1038/s41598-022-06296-3.

Kühne, Olaf (2024): Phänomenologische Landschaftsforschung. In: Olaf Kühne, Florian Weber, Karsten Berr und Corinna Jenal (Hg.): Handbuch Landschaft. 2nd ed. 2024. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer VS (RaumFragen), S. 197–207. Online verfügbar unter 197-207.

Kuliga, S. F.; Thrash, T.; Dalton, R. C.; Hölscher, C. (2015): Virtual reality as an empirical research tool — Exploring user experience in a real building and a corresponding virtual model. In: *Computers, Environment and Urban Systems* (54), S. 363–375. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2015.09.006.

Küller, Rikard; Mikellides, Byron; Janssens, Jan (2009): Color, arousal, and performance—A comparison of three experiments. In: *Color Research & Application* 34 (2), S. 141–152. DOI: 10.1002/col.20476.

Kumar, Rohit; Dhar, Debayan (2023): Unraveling the Potenzial of Immersive Virtual Environments for Behavior Mapping in the Built Environment: A Mapping Review. In: *Human Behavior and Emerging Technologies* 2023, S. 1–19. DOI: 10.1155/2023/8871834.

Kurita, Satoshi; Tsutsumimoto, Kota; Doi, Takehiko; Nakakubo, Sho; Kim, Minji; Ishii, Hideaki; Shimada, Hiroyuki (2020): Association of physical and/or cognitive activity with cognitive impairment in older adults. In: *Geriatrics & gerontology international* 20 (1), S. 31–35. DOI: 10.1111/ggi.13814.

LaBrot, Zachary C.; Radley, Keith C.; Dart, Evan; Moore, James; Cavell, Hannah J. (2018): A component analysis of behavioral skills training for effective instruction delivery. In: *Journal of Family Psychotherapy* 29 (2), S. 122–141. DOI: 10.1080/08975353.2017.1368813.

Lameka, Katherine; Farwell, Michael D.; Ichise, Masanori (2016): Positron Emission Tomography. In: *Handbook of clinical neurology* 135, S. 209–227. DOI: 10.1016/B978-0-444-53485-9.00011-8.

Layeb, S.; Hussein, F. Ghozi, R.; Jaidane, M. (2016): Identification of Stress Situations in Urban Space: When Biosensors Capture Emotions. In: *ALLSENSORS 2016* (The First International Conference on Advances in Sensors, Actuators, Metering and Sensing).

Lederbogen, Florian; Kirsch, Peter; Haddad, Leila; Streit, Fabian; Tost, Heike; Schuch, Philipp et al. (2011): City living and urban upbringing affect neural social stress processing in humans. In: *Nature* 474 (7352), S. 498–501. DOI: 10.1038/ nature10190.

Lefaucheur, Jean-Pascal (2019): Transcranial magnetic stimulation. In: *Handbook of clinical neurology* 160, S. 559–580. DOI: 10.1016/B978-0-444-64032-1.00037-0.

Lengauer, Roland (2023): SPECT (Single-Photon-Emissionscomputertomografie). Online verfügbar unter https://www.gesundheit.gv.at/labor/untersuchungen/nuklearmedizin/spect.html, zuletzt aktualisiert am 06.11.2023, zuletzt geprüft am 18.09.2024.

Li, Jie; Zhang, Zhonghao; Fu, Jing; Gao, Jun; Ma, Jianyu; Shao, Guafan; Noel, Scott (2020): An evaluation of urban green space in Shanghai, China, using Eyetracking. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 56 (126903). DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126903.

Li, Rui; Klippel, Alexander (2010): Using space syntax to understand knowledge acquisition and wayfinding in indoor environments. In: 9th IEEE International Conference on Cognitive Informatics (ICCI'10). 2010 9th IEEE International Conference on Cognitive Informatics (ICCI). Beijing, China, 07.07.2010 - 09.07.2010: IEEE, S. 302–307.

Liberatore, Matthew J.; Wagner, Wiliam P. (2021): Virtual, mixed, and augmented reality: a systematic review for immersive systems research. In: *Virtual Reality* (25), S. 773–799. DOI: 10.1007/s10055-020-00492-0.

Lu, Mingli; Hu, Songtao; Zhao, Xiaoli; Guo, Chengji; Xue, Linghui; Liu, Guodan; Ji, Yihang (2023): Characteristics of facial electromyography during cold exposure and feasibility of evaluating thermal comfort. In: *Building and Environment* 246, S. 110992. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110992.

Maison, Dominika; Greenwald, Anthony G.; Bruin, Ralph H. (2001): The implicit association test as a measure of implicit consumer attitudes. In: *Polish Psychological Bulletin* (32), S. 1–9.

Markgraf, Daniel (2018): Augmented Reality. Online verfügbar unter https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/augmented-reality-53628/version-276701, zuletzt aktualisiert am 16.08.2018, zuletzt geprüft am 17.09.2024.

Marras, William S. (2000): Overview of Electromyography in Ergonomics. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 44 (30), 5-534-5-536. DOI: 10.1177/154193120004403037.

Mason, Winter; Suri, Siddharth (2012): Conducting behavioral research on Amazon's Mechanical Turk. In: *Behavior research methods* 44 (1), S. 1–23. DOI: 10.3758/s13428-011-0124-6.

Matei, Sorin; Ball-Rokeach, Sandra; Linchuan Qui, Jack (2001): Fear and Misperception of Los Angeles Urban Space: A Spatial-Statistical Study of Communication-Shaped Mental Maps Communication Research (28), S. 429–463.

Mavros, Panagiotis; Austwick, Martin Zaltz; Smith, Andrew Hudson (2016): Geo-EEG: Towards the Use of EEG in the Study of Urban Behaviour. In: *Applied Spatial Analysis and Policy* 9 (2), S. 191–212. DOI: 10.1007/s12061-015-9181-z.

Mavros, Panagiotis; J Wälti, Michel; Nazemi, Mohsen; Ong, Crystal Huiyi; Hölscher, Christoph (2022): A mobile EEG study on the psychophysiological effects of walking and crowding in indoor and outdoor urban environments. In: *Scientific reports* 12 (1), S. 18476. DOI: 10.1038/s41598-022-20649-y.

Mayo Clinic (2023): Transcranial magnetic stimulation. Online verfügbar unter https://www.mayoclinic.org/tests-procedures/transcranial-magnetic-stimulation/about/pac-20384625, zuletzt aktualisiert am 07.04.2023, zuletzt geprüft am 18.09.2024.

Mayoh, Joanne; Onwuegbuzi, Anthony J. (2013): Toward a Conceptualization of Mixed Methods Phenomenological Research 9 (1). DOI: 10.1177/1558689813505358.

Mbt (2024): Mobile EEG company. Online verfügbar unter https://mbraintrain.com/smarting-pro-line/, zuletzt geprüft am 18.09.2024.

Medizinische Hochschule Hannover (2024): Kostenaufstellung. Online verfügbar unter https://www.mhh.de/fileadmin/mhh/nuklearmedizin/PDF/Kostenaufstellung_PMI_MHH_DFG_0113.pdf, zuletzt geprüft am 18.09.2024.

Medmovie (2024): Spect Scan. Online verfügbar unter https://medmovie.com/library_id/7556/topic/cvml_3948/, zuletzt geprüft am 23.09.2024.

Mengelkoch, Summer; Moriarity, Daniel P.; Novak, Anne Marie; Snyder, Michael P.; Slavich, George M.; Lev-Ari, Shahar (2023): Using Ecological Momentary Assessments to Study How Daily Fluctuations in Psychological States Impact Stress, Well-Being, and Health. In: *Journal of clinical medicine* 13 (1). DOI: 10.3390/jcm13010024.

Mennis, Jeremy; Mason, Michael; Ambrus, Andreea (2018): Urban Greenspace is Associated with Reduced Psychological Stress among Adolescents: A Geographic Ecological Momentary Assessment (GEMA) Analysis of Activity Space. In: *Landscape and urban planning* 174, S. 1–9. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2018.02.008.

Meyerding, Stephan G.H.; Mehlhose, Clara M. (2020): Can neuromarketing add value to the traditional marketing research? An exemplary experiment with functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). In: *Journal of Business Research* 107, S. 172–185. DOI: 10.1016/j.jbusres.2018.10.052.

Miles, Stephanie; Howlett, Caitlin A.; Berryman, Carolyn; Nedeljkovic, Maja; Moseley, G. Lorimer; Phillipou, Andrea (2021): Considerations for using the Wisconsin Card Sorting Test to assess cognitive flexibility. In: *Behavior research methods* 53 (5), S. 2083–2091. DOI: 10.3758/s13428-021-01551-3.

Mocker, Daniela (2018): Diesen Hirnscanner kann man sich aufsetzen. Online verfügbar unter https://www.spektrum.de/news/diesen-hirnscanner-kann-man-sich-aufsetzen/1553696, zuletzt aktualisiert am 22.03.2018, zuletzt geprüft am 23.09.2024.

Molones, Jules (2006): Augmented Reality Visualisation of the Built Environment To Support Design Decision Making. In: *Proceedings of the Information Visualization (IV'06)*. DOI: 10.1109/IV.2006.25.

Mori, Susumu; Zhang, Jiangyang (2006): Principles of diffusion tensor imaging and its applications to basic neuroscience research. In: *Neuron* 51 (5), S. 527–539. DOI: 10.1016/j.neuron.2006.08.012.

Newell, Graeme (2023): Real Estate Insights The increasing importance of the "S" dimension in ESG. In: *JPIF* 41 (4), S. 453–459. DOI: 10.1108/JPIF-01-2023-0003.

Nold, Christian (2004): Bio Mapping / Emotion Mapping. Online verfügbar unter http://biomapping.net/, zuletzt geprüft am 17.09.2024.

Nonnenmacher (2024): Magnetoenzephalografie. Online verfügbar unter https://medlexi.de/Magnetoenzephalografie, zuletzt aktualisiert am 21.03.2024, zuletzt geprüft am 23.09.2024.

Nyhus, Erika; Barceló, Francisco (2009): The Wisconsin Card Sorting Test and the cognitive assessment of prefrontal executive functions: A critical update. In: *Brain and cognition* 71 (3), S. 437–451. DOI: 10.1016/j.bandc.2009.03.005.

O. Barroso, Filipe; Pascual-Valdunciel, Alejandro; Torricelli, Diego; C. Moreno, Juan; Del Ama-Espinosa, Antonio; Laczko, Jozsef; L. Pons, José (2019): Noninvasive Modalities Used in Spinal Cord Injury Rehabilitation. In: Spinal Cord Injury Therapy [Working Title]: IntechOpen.

Olszewska, Agnieszka A. Marques, Paulo F.; Barbosa, Fernando (2014): Urban Planning, Neurosciences and Contemplation for improving well-being in our cities. In: *ARCC/EAAE 2014 - Beyond Architecture: New Intersections & Connections Re-Disciplining: The Rise, Fall and Reformation of the Disciplines. History, Theory, Historiography, and Future Studies*.

Olszewska-Guizzo, Agnieszka; Mukoyama, Ayako; Naganawa, Sho; Dan, Ippeita; Husain, Syeda Fabeha; Ho, Cyrus S.; Ho, Roger (2021): Hemodynamic Response to Three Types of Urban Spaces before and after Lockdown during the COVID-19 Pandemic. In: *IJERPH* 18 (11), S. 6118. DOI: 10.3390/ijerph18116118.

OPC Health (2024): Two Point Discriminator. Online verfügbar unter https://www.opchealth.com.au/two-point-discriminator, zuletzt geprüft am 17.09.2024.

Pafka, Elek; Dovey, Kim; Aschwanden, Gideon DPA (2020): Limits of space syntax for urban design: Axiality, scale and sinuosity. In: *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science* 47 (3), S. 508–522. DOI: 10.1177/2399808318786512.

Palmberger, Monika (2022): Digitale Medien und Methoden. Digitale Tagebücher als "Media of Care" und Narrative der Flucht. Hg. v. Zeitschrift für Medienwissenschaft. Online verfügbar unter https://lirias.kuleuven.be/retrieve/661900, zuletzt aktualisiert am 05.02.2022, zuletzt geprüft am 17.09.2024.

Palmer, Trent C.; Shan, Jeffrey (2002): A Comparative Study on Urban Visualization Using LIDAR Data in GIS. In: *URISA Journal* 14 (2), S. 19–25.

Paul, P. K. (2024): Aspekte von Biosensoren mit Bezug auf aufkommende Implikationen von künstlicher Intelligenz, Big Data und Analytik: Der Wandel im Gesundheitswesen – Ein allgemeiner Überblick. In: Gorachand Dutta und Arindam Biswas (Hg.): Intelligente Nano-Bio-Geräte der nächsten Generation. Singapore: Springer Nature Singapore, S. 1–20.

Paül i Agustí, Daniel; Guilera, Teresa; Guerrero Lladós, Montserrat (2022): Gender differences between the emotions experienced and those identified in an urban space, based on heart rate variability. In: *Cities* 131, S. 104000. DOI: 10.1016/j.cities.2022.104000.

Paül i Agustí, Daniel; Rutllant, Jaume; Lasala Fortea, José (2019): Differences in the perception of urban space via mental maps and Heart Rate Variation (HRV). In: *Applied Geography* 112, S. 102084. DOI: 10.1016/j.apgeog.2019.102084.

Pesaran, Bijan (2010): Neural correlations, decisions, and actions. In: *Current opinion in neurobiology* 20 (2), S. 166–171. DOI: 10.1016/j.conb.2010.03.003.

Pfnür, Andreas (2011): Immobilienentwicklung. In: Andreas Pfnür (Hg.): Modernes Immobilienmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 333–361.

Pfnür, Andreas (Hg.) (2011): Modernes Immobilienmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Pfnür, Andreas; Rau, Jonas (2023): Transformation deutscher Innenstädte aus Sicht der Eigentümer. Eine systematische Literaturanalyse. In: *Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis* (Band Nr. 48), Technische Universität Darmstadt.

Pfnür, Andreas; Rau, Jonas (2024): Transformation der Innenstädte – Empirische Studie bei privaten Haushalten. Teil I: Nutzungskonzepte deutscher Innenstädte. In: *Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis* (Band Nr. 52), Technische Universität Darmstadt.

Pfnür, Andreas; Rau, Jonas (2024): Transformation der Innenstädte – Empirische Studie bei privaten Haushalten. Teil II: Bürgerpräferenzen zur Transformation des Innenstadtquartiers und -immobilien. In: *Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis* (Band Nr. 53), Technische Universität Darmstadt.

Piasecki, Thomas M.; Hufford, Michael R.; Solhan, Marika; Trull, Timothy J. (2007): Assessing clients in their natural environments with electronic diaries: rationale, benefits, limitations, and barriers. In: *Psychological assessment* 19 (1), S. 25–43. DOI: 10.1037/1040-3590.19.1.25.

Pierański, Bartłomiej; Berčík, Jakub (2021): Research on electrodermal activity. In: Sylwester Białowąs (Hg.): Experimental design and biometric research. Toward innovations: Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu, S. 61–88.

Poldrack, Russell A. (2006): Can cognitive processes be inferred from neuroimaging data? In: *Trends in cognitive sciences* 10 (2), S. 59–63. DOI: 10.1016/j.tics.2005.12.004.

Poulsen, Esben S.; Andersen, Hans J.; Gade, Rikke; Jensen, Ole B.; Moeslund, Thomas B. (2012): Using Human Motion Intensity as Input for Urban Design. In: Reiner Wichert, Kristof van Laerhoven und Jean Gelissen (Hg.): Constructing Ambient Intelligence, Bd. 277. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Communications in Computer and Information Science), S. 128–136.

Price, Shelley A.; Beech, Anthony R.; Mitchell, Ian J.; Humphreys, Glyn W. (2012): The promises and perils of the emotional Stroop task: A general review and considerations for use with forensic samples. In: *Journal of Sexual Aggression* 18 (3), S. 253–268. DOI: 10.1080/13552600.2010.545149.

Pykett, Jessica; Osborne, Tess; Resch, Bernd (2020): From Urban Stress to Neurourbanism: How Should We Research City Well-Being? In: *Annals of the American Association of Geographers* 110 (6), S. 1936–1951. DOI: 10.1080/24694452.2020.1736982.

Quasthoff, Stefan (2010): Grundlagen der EMG Untersuchung. In: *Das Neurophysiologie-Labor* 32 (1), S. 1–27. DOI: 10.1016/j.neulab.2009.08.003.

Qureshi, Cyrus; Schnabel, Marc A.; Moleta, Tane J. (2018): CityAR: Wellington Exploring Cities through Mixed Realities. In: *Conference: Computing for a Better Tomorrow, 36th Annual Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe2018),At: Lodz, Poland* (2), S. 687–692. DOI: 10.52842/conf.ecaade.2018.2.687.

Rahmati, Ahmad; Zhong, Lin (2013): Studying Smartphone Usage: Lessons from a Four-Month Field Study. In: *IEEE Trans. on Mobile Comput.* 12 (7), S. 1417–1427. DOI: 10.1109/TMC.2012.127.

Ratti, Carlo (2005): The Lineage of the Line: Space Syntax Parameters from the Analysis of Urban DEMs. In: *Environ. Plann. B* 32 (4), S. 547–566. DOI: 10.1068/b31045.

Rebay-Salisbury, Katharina (2013): Phänomenologie und Landschaft: der menschliche Körper in Bewegung. In: *in R. Karl and J. Leskovar (eds) Interpretierte Eisenzeiten, Studien zur Kulturgeschichte von Oberösterreich 37*, S. 61–70.

Reggente, Nicco; Essoe, Joey K-Y; Aghajan, Zahra M.; Tavakoli, Amir V.; McGuire, Joseph F.; Suthana, Nanthia A.; Rissman, Jesse (2018): Enhancing the Ecological Validity of fMRI Memory Research Using Virtual Reality. In: *Frontiers in neuroscience* 12, S. 408. DOI: 10.3389/fnins.2018.00408.

Rehan, Reeman M. (2016): The phonic identity of the city urban soundscape for sustainable spaces. In: *HBRC Journal* 12 (3), S. 337–349. DOI: 10.1016/j.hbrcj.2014.12.005.

Rey, Guenther D. (2024): Eyetracker. Online verfügbar unter http://www.elearning-psychologie.de/eyetracker_i.html, zuletzt geprüft am 17.09.2024.

Reypens, Charlotte; Levine, Sheen S. (2017): Chapter 6: To Grasp Cognition in Action, Combine Behavioral Experiments with Protocol Analysis. In: Robert J. Galavan, Kristian J. Sund und Gerard P. Hodgkinson (Hg.): Methodological Challenges and Advances in Managerial and Organizational Cognition, Bd. 2: Emerald Publishing Limited (New Horizons in Managerial and Organizational Cognition), S. 123–146.

Ritchie, Ian (Hg.) (2020): Neuro architecture. Designing with the mind in mind. John Wiley and Sons. Oxford: John Wiley & Sons (Architectural design, vol 90, 06 (November/December 2020)).

Robinson, Spenser; McIntosh, Michael G. (2022): A Literature Review of Environmental, Social, and Governance (ESG) in Commercial Real Estate. In: *Journal of Real Estate Literature* 30 (1-2), S. 54–67. DOI: 10.1080/09277544.2022.2106639.

Roe, Jenny J.; Thompson, Catharine Ward; Aspinall, Peter A.; Brewer, Mark J.; Duff, Elizabeth I.; Miller, David et al. (2013): Green space and stress: evidence from cortisol measures in deprived urban communities. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 10 (9), S. 4086–4103. DOI: 10.3390/ijerph10094086.

Rosenberg Weinreb, Amelia; Rofé, Yodan (2013): Mapping Feeling: An Approach to the Study of Emotional Response to Built Environment and Landscape. In: *Journal of Architectural and Planning Research* 30 (2), S. 127–145.

Rosenstein, Barbara (2002): Video Use in Social Science Research and Program Evaluation. In: *International Journal of Qualitative Methods* 1 (3), S. 22–43. DOI: 10.1177/160940690200100302.

Sakuragawa, Satoshi; Miyazaki, Yoshifumi; Kaneko, Tomoyuki; Makita, Teruo (2005): Influence of wood wall panels on physiological and psychological responses. In: *J Wood Sci* 51 (2), S. 136–140. DOI: 10.1007/s10086-004-0643-1.

Salzberger, H.; Müller-Judex, L.; Just, T. (2024): Schlüsselfaktor S: Soziale Nachhaltigkeit in der Immobilienwirtschaft - Auf dem Weg zu einem europäischen Bewertungsstandard. Wiesbaden (gif-Studie Nr. S-03-2024).

Sanoff, Henry (2016): Visual Research Methods in Design (Routledge Revivals): Routledge.

Sato, Yusuke; Fukuda, Tomohiro; Yabuki, Nobuyoshi; Michikawa, Takashi; Motamedi, Ali (2016): A Marker-less Augmented Reality System using Image Processing Techniques for Architec-ture and Urban Environment. In: *The 21st International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, S. 713–722. DOI: 10.52842/conf.caadria.2016.713.

Scheller, Frieder W.; Bier, Frank F.; Pfeiffer, Dorothea (1995): Biosensoren: Grundlagen und Anwendungen. In: *tm - Technisches Messen* 62 (JG), S. 213–219. DOI: 10.1524/teme.1995.62.jg.213.

Schlittmeier, Sabine J.; Feil, Alexandra; Liebl, Andreas; Hellbr Ck, J. Rgen (2015): The impact of road traffic noise on cognitive performance in attention-based tasks depends on noise level even within moderate-level ranges. In: *Noise & health* 17 (76), S. 148–157. DOI: 10.4103/1463-1741.155845.

Schmid, Rolf D.; Bilitewski, Ursula (1992): Biosensoren. In: *Chemie in nserer Zeit* 26 (4), S. 163–174. DOI: 10.1002/ciuz.19920260406.

Schofield, Holly; Hill, Ryan M.; Feys, Odile; Holmes, Niall; Osborne, James; Doyle, Cody et al. (2024): A Novel, Robust, and Portable Platform for Magnetoencephalography using Optically Pumped Magnetometers. In: *Imaging Neuroscience*. DOI: 10.1162/imag_a_00283.

Seichter, Hartmut (2004): Benchworks. Augmented Reality Urban Design. In: *H. S. Lee and J. W. Choi (eds.) Computer Aided Architectural Design Research in Asia*, S. 937–946.

Senevirathna, Bathiya; Berman, Lauren; Bertoni, Nicola; Pareschi, Fabio; Mangia, Mauro; Rovatti, Riccardo et al. (2016): Low cost mobile EEG for characterization of cortical auditory responses. In: 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Montréal, QC, Canada, 22.05.2016 - 25.05.2016: IEEE, S. 1102–1105.

Shoval, Noam (2008): The GPS Revolution in Spatial Research. 15-21 Pages / Research in Urbanism Series, Vol. 1 (2008): Urbanism on Track: Application of tracking technologies in urbanism. DOI: 10.7480/RIUS.1.193.

Shukla, A. K.; Kumar, Utham (2006): Positron emission tomography: An overview. In: *Journal of medical physics* 31 (1), S. 13–21. DOI: 10.4103/0971-6203.25665.

Sigmundsson, Hermundur; Dybendal, Benjamin H.; Grassini, Simone (2022): Motion, Relation, and Passion in Brain Physiological and Cognitive Aging. In: *Brain sciences* 12 (9). DOI: 10.3390/brainsci12091122.

Simon, S.; Johnson, K. (2000): Improving the efficacy of motion analysis as a clinical tool through artificial intelligence techniques. In: Pediatric Gait: A New Millennium in Clinical Care and Motion Analysis Technology. Pediatric Gait: A New Millennium in Clinical Care and Motion Analysis Technology. Chicago, IL, USA, 22 July 2000: IEEE, S. 23–29.

Snyder, Hannah (2019): Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. In: *Journal of Business Research* (104), 333-339. DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.

Spektrum (2024): Kinematik. Lexikon der Physik. Online verfügbar unter https://www.spektrum.de/lexikon/physik/kinematik/8021, zuletzt geprüft am 19.09.2024.

Stein, Thorsten; Fischer, Andreas; Boesnach, Ingo; Gehirng, Dirk; Köhler, Hildegard; Schwameder, Hermann (2007): Kinematische Analyse menschlicher Alltagsbewegungen für die Mensch-Maschine-Interaktion: Sporttechnologie zwischen Theorie und Praxis: V. Aachen: Shaker.

Stephan, Achim; Walter, Sven (Hg.) (2013): Handbuch Kognitionswissenschaft. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Stevenson, Ryan A.; Ghose, Dipanwita; Fister, Juliane Krueger; Sarko, Diana K.; Altieri, Nicholas A.; Nidiffer, Aaron R. et al. (2014): Identifying and quantifying multisensory integration: a tutorial review. In: *Brain topography* 27 (6), S. 707–730. DOI: 10.1007/s10548-014-0365-7.

Strafella, A. P.; Paus, T. (2001): Cerebral blood-flow changes induced by paired-pulse transcranial magnetic stimulation of the primary motor cortex. In: *Journal of neurophysiology* 85 (6), S. 2624–2629. DOI: 10.1152/jn.2001.85.6.2624.

Sturm, Thomas; Gundlach, Horst (2013): Ursprünge und Anfände der Kognitionswissenschaft. In: Achim Stephan und Sven Walter (Hg.): Handbuch Kognitionswissenschaft. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 7–21.

Tai, Y. F.; Piccini, P. (2004): Applications of positron emission tomography (PET) in neurology. In: *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry* 75 (5), S. 669–676. DOI: 10.1136/jnnp.2003.028175.

Turker, Hande (Hg.) (2013): Electrodiagnosis in New Frontiers of Clinical Research: InTech.

Turker, Hande; Sze, Hasan (2013): Surface Electromyography in Sports and Exercise. In: Hande Turker (Hg.): Electrodiagnosis in New Frontiers of Clinical Research: InTech.

Tuszyńska-Bogucka, Wioletta; Kwiatkowski, Bartłomiej; Chmielewska, Magdalena; Dzieńkowski, Mariusz; Kocki, Wojciech; Pełka, Jarosław et al. (2020): The effects of interior design on wellness - Eyetracking analysis in determining emotional experience of architectural space. A survey on a group of volunteers from the Lublin Region, Eastern Poland. In: *Annals of agricultural and environmental medicine : AAEM* 27 (1), S. 113–122. DOI: 10.26444/aaem/106233.

UCL (2024): Ecological Brain DTP. Online verfügbar unter https://www.ucl.ac.uk/pals/ecological-brain-dtp, zuletzt geprüft am 23.09.2024.

UNC School of Medicine (2024): Transcranial Magnetic Stimulation (TMS) Therapy. Online verfügbar unter https://www.med.unc.edu/psych/patient-care/interventional-psychiatry/tms/, zuletzt geprüft am 18.09.2024.

Universität Oldenburg (2024): Magnetencephalografie. Online verfügbar unter https://uol.de/neuroimaging/probandeninformation/meg, zuletzt aktualisiert am 20.06.2024, zuletzt geprüft am 23.09.2024.

Universität Zürich (2024): Strukturelle Magnetresonanztomografie (sMRT), Diffusion Tensor Imaging (DTI) und funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT). Information über neurowissenschaftliche Methoden. Online verfügbar unter https://www.dynage.uzh.ch/dam/jcr:3d32a304-e86e-4aa5-8af2-2d71b05d6967/Neurowiss.Methoden_sMRTDTIfMRT.pdf, zuletzt geprüft am 22.09.2024.

Universitätsklinikum Heidelberg (2024): Diffusions-Tensor-Bildgebung (DTI) und funktionelle Magnetresonanztomografie (FMRT). Online verfügbar unter

https://www.klinikum.uni-heidelberg.de/verfahren/diffusions-tensor-bildgebung-dti-und-funktionelle-magnetresonanztomografie-fmrt-201572, zuletzt geprüft am 22.09.2024.

Universitätsspital Bern (2024): Untersuchungsablauf. Positronen-Emissions-Tomografie (PET/CT). Online verfügbar unter https://nukmed.insel.ch/de/patientinnen-und-besucherinnen/ambulante-behandlung/untersuchungsablauf, zuletzt geprüft am 17.09.2024.

Vaez, Sima; Burke, Matthew; Alizadeh, Tooran (2016): Urban Form and Wayfinding: Review of Cognitive and Spatial Knowledge for Individuals' Navigation. In: *38th Australasian Transport Research Forum Conference, Melbourne, Australia*.

van der Spek, S. (2009): Measuring and observing pedestrian activity; tracking pedestrians in Norwich, Rouen and Koblenz. Hg. v. Conference Paper, Department of Urbanism, TU Delft. Online verfügbar unter https://resolver.tudelft.nl/uuid:1d1829b3-c916-459f-a33e-89071dfad8e9, zuletzt geprüft am 20.09.2024.

Vaquero, Juan José; Kinahan, Paul (2015): Positron Emission Tomography: Current Challenges and Opportunities for Technological Advances in Clinical and Preclinical Imaging Systems. In: *Annual review of biomedical engineering* 17, S. 385–414. DOI: 10.1146/annurev-bioeng-071114-040723.

Vartanian, Oshin; Navarrete, Gorka; Chatterjee, Anjan; Fich, Lars Brorson; Leder, Helmut; Modroño, Cristián et al. (2013): Impact of contour on aesthetic judgments and approach-avoidance decisions in architecture. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110 Suppl 2 (Suppl 2), S. 10446–10453. DOI: 10.1073/pnas.1301227110.

Vecchiato, Giovanni; Tieri, Gaetano; Jelic, Andrea; Matteis, Federico de; Maglione, Anton G.; Babiloni, Fabio (2015): Electroencephalographic Correlates of Sensorimotor Integration and Embodiment during the Appreciation of Virtual Architectural Environments. In: *Frontiers in psychology* 6, S. 1944. DOI: 10.3389/fpsyg.2015.01944.

Viviani, Giada; Visalli, Antonino; Montefinese, Maria; Vallesi, Antonino; Ambrosini, Ettore (2024): The Stroop legacy: A cautionary tale on methodological issues and a proposed spatial solution. In: *Behavior research methods* 56 (5), S. 4758–4785. DOI: 10.3758/s13428-023-02215-0.

Voigt, Torsten H. (2020): Neurowissenschaften und Gesundheitsförderung. Hg. v. Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung (BZgA).

VRExpert (2024): Pico Neo 3 Pro Eye. Online verfügbar unter https://vr-expert.de/vr-brille/pico-neo-3-pro-eye-kaufen/#:~:text=Die%20Pico%20Neo%203%20Pro,%C3%BCber%20integriertes%20Eye%2DTracking%20verf%C3%BCgt., zuletzt geprüft am 20.09.2024.

Vroman, Liselotte; Lagrange, Thierry (2017): Human movement in Public spaces: The use and development of motion-oriented design strategies. In: *The Design Journal* 20 (sup1), S3252-S3261. DOI: 10.1080/14606925.2017.1352830.

Wald, Johanna; Rohrbach, Nina (2024): irtual Reality. Hg. v. Bayrisches Forschungsinstitut für Digitale Transformation. Online verfügbar unter https://www.bidt.digital/glossar/virtual-reality/, zuletzt geprüft am 17.09.2024.

Walter, Sven; Besold, Tarek R.; Kühnberger, Kai-Uwe; Schöner, Gregor; Rohde, Marieke; Lyre, Holger (2013): Strukturen kognitiver Systeme. In: Achim Stephan und Sven Walter (Hg.): Handbuch Kognitionswissenschaft. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 153–219.

Wang, Ruisheng; Peethambaran, Jiju; Chen, Dong (2018): LiDAR Point Clouds to 3-D Urban Models$:$ A Review. In: *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing* 11 (2), S. 606–627. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2781132.

Wehner, Michael (2012): Man to Machine, Applications in Electromyography. In: Mark Schwartz (Hg.): EMG Methods for Evaluating Muscle and Nerve Function: InTech.

Whyatt, Georgina (2004): Town centre management: how theory informs a strategic approach. In: *International Journal of Retail & Distribution Management* 32 (7), S. 346–353. DOI: 10.1108/09590550410541462.

Wilhelm, Thorsten (2010): Eyetracking (Blickbewegungsmessung) ist teuer – stimmt das wirklich? Online verfügbar unter https://www.usabilityblog.de/eyetracking-blickbewegungsmessung-ist-teuer-stimmt-das-wirklich/, zuletzt aktualisiert am 29.06.2010, zuletzt geprüft am 17.09.2024.

Wöhrle, Johannes (2024): Elektromyografi (EMG). Online verfügbar unter https://www.springermedizin.de/emedpedia/detail/klinische-neurologie/elektromyografie-emg?epediaDoi=10.1007%2F978-3-662-44768-0_11, zuletzt geprüft am 19.09.2024.

Wong, Geoff; Greenhalgh, Trish; Westhorp, Gill; Buckingham, Jeanette; Pawson, Ray (2013): RAMESES publication standards: meta-narrative reviews. In: *BMC medicine* 11, S. 20. DOI: 10.1186/1741-7015-11-20.

Xiao, Yan; Milgram, Paul (2015): Dare I Embark On A Field Study? Toward An Understanding Of Field Studies. In: *TQR*. DOI: 10.46743/2160-3715/2003.1893.

Yannas, Simons (2009): What Can Buildings Tell Us, What Can We Tell Back. In: *PLEA Conference, Quebec City, Canada*.

Yin, Jie; Arfaei, Nastaran; MacNaughton, Piers; Catalano, Paul J.; Allen, Joseph G.; Spengler, John D. (2019): Effects of biophilic interventions in office on stress reaction and cognitive function: A randomized crossover study in virtual reality. In: *Indoor air* 29 (6), S. 1028–1039. DOI: 10.1111/ina.12593.

Yin, Jie; Yuan, Jing; Arfaei, Nastaran; Catalano, Paul J.; Allen, Joseph G.; Spengler, John D. (2020): Effects of biophilic indoor environment on stress and anxiety recovery: A between-subjects experiment in virtual reality. In: *Environment international* 136, S. 105427. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105427.

Yin, Zixiao; Zhu, Guanyu; Zhao, Baotian; Bai, Yutong; Jiang, Yin; Neumann, Wolf-Julian et al. (2021): Local field Potenzials in Parkinson's disease: A frequency-based review. In: *Neurobiology of disease* 155, S. 105372. DOI: 10.1016/j.nbd.2021.105372.

Yousem, David M. (2014): The economics of functional magnetic resonance imaging: clinical and research. In: *Neuroimaging clinics of North America* 24 (4), S. 717–724. DOI: 10.1016/j.nic.2014.07.007.

Zhang, Mei; Kang, Jian (2007): Towards the evaluation, description, and creation of soundscapes in urban open spaces. In: *Environ. Plann. B* 34 (1), S. 68–86. DOI: 10.1068/b31162.

Zhang, Yuxuan; Liu, Hexu; Kang, Shih-Chung; Al-Hussein, Mohamed (2020): Virtual reality applications for the built environment: Research trends and opportunities. In: *Automation in Construction* 118 (103311). DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103311.

Zhang, Zijiao; Zhuo, Kangfu; Wei, Wenhan; Li, Fu; Yin, Jie; Xu, Liyan (2021): Emotional Responses to the Visual Patterns of Urban Streets: Evidence from Physiological and Subjective Indicators. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18 (18). DOI: 10.3390/ijerph18189677.

Bisher in dieser Reihe erschienen

Alexander Herrmann (2005): Analyse der Anfangsrenditen in Frankfurt, Paris, London & New York. Ein Beitrag zur Vergleichbarkeit von Immobilienrenditen. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 1 , Technische Universität Darmstadt.

Alexander Bräscher (2005): Real Estate Private Equity (REPE) im Spannungsfeld von Entwickler, Kreditinstitut und Private-Equity-Gesellschaft. Ergebnisbericht zur empirischen Untersuchung. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 2 , Technische Universität Darmstadt.

Nadine Hainbuch (2006): Status quo und Perspektiven immobilienwirtschaftlicher PPPs. PPP im öffentlichen Hochbau in Deutschland aus Sicht des privaten Investors. Ergebnisse einer empirischen Analyse. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 3 , Technische Universität Darmstadt.

Arbeitskreis PPP im Management öffentlicher Immobilien im BPPP e.V. (2006): Risiken imobilienwirtschaftlicher PPPs aus Sicht der beteiligten Akteure. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 4 , Technische Universität Darmstadt.

Sebastian Kühlmann (2006): Systematik und Abgrenzung von PPP-Modellen und Begriffen. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 5 , Technische Universität Darmstadt.

Dirk Krupper (2006): Target Costing für die Projektentwicklung von Immobilien als Instrument im Building Performance Evaluation Framework. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 6 , Technische Universität Darmstadt.

Moritz Lohse (2006): Die wirtschaftliche Situation deutscher Wohnungsunternehmen – eine empirische Untersuchung. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 7 , Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Patricia Egres, Klaus Hirt (2007): Ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsanalyse bei PPP Projekten dargestellt am Beispiel des Schulprojekts im Kreis Offenbach. Ergebnisbericht zur empirischen Untersuchung. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 8 , Technische Universität Darmstadt.

Arbeitskreis PPP im Management öffentlicher Immobilien im BPPP e.V. (2007): Optimierung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen in immobilienwirtschaftlichen PPPs. Ein Thesenpapier. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 9 , Technische Universität Darmstadt.

Steffen Hartmann, Moritz Lohse, Andreas Pfnür (2007): 15 Jahre Corporate Real Estate Management in Deutschland: Entwicklungsstand und Perspektiven der Bündelung immobilienwirtschaftlicher Aufgaben bei ausgewählten Unternehmen. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 10 , Technische Universität Darmstadt.

Henning Schöbener, Christoph Schetter, Andreas Pfnür (2007): Reliability of Public Private Partnership Projects under Assumptions of Cash Flow Volatility. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 11 , Technische Universität Darmstadt.

Moritz Lohse, Andreas Pfnür (2008): EWOWI zwanzig zehn – Erfolgspotenziale der Wohnungswirtschaft 2010. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 12 , Technische Universität Darmstadt.

Arbeitskreis PPP im Management öffentlicher Immobilien im BPPP e.V. (2009): Optimierung von Transaktionskosten öffentlicher Immobilieninvestitionen. Ein Thesenpapier. In:Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 13 , Technische Universität Darmstadt.

Annette Kämpf-Dern, Andreas Pfnür (2009): Grundkonzept des Immobilienmanagements. Ein Vorschlag zur Strukturierung immobilienwirtschaftlicher Managementaufgaben. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 14 , Technische Universität Darmstadt.

Annette Kämpf-Dern (2009): Immobilienwirtschaftliche Managementebenen und -aufgaben. Definitions- und Leistungskatalog des Immobilienmanagements. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 15 , Technische Universität Darmstadt.

Sonja Weiland, Andreas Pfnür (2009): Empirische Untersuchung der Nutzenwirkungen von PPP Projekten auf den Schulbetrieb am Beispiel der Schulen im Kreis Offenbach. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 16 , Technische Universität Darmstadt.

Sigrun Wonneberger (2009): Die Auswahl von Propertymanagement Dienstleistern – Ergebnisbericht zur empirischen Untersuchung. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 17 , Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Nikolas Müller, Sonja Weiland (2009): Wirtschaftlichkeitsberechnungen von Klimaschutzinvestitionen in der Wohnungswirtschaft – Clusteranalyse und 25 Szenariofälle. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 18 , Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Wulf Reclam, Fabian Heyden, Friedemann Kuppler, Julian Thiel (2010): Status quo der Kernkompetenzen und Outsourcing-Aktivitäten in der deutschen Wohnungswirtschaft. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 19 , Technische Universität Darmstadt.

Michael G. Müller (2010): Komparative Untersuchung der EU-REIT-Regime. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 20 , Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Sonja Weiland (2010): CREM 2010: Welche Rolle spielt der Nutzer? In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 21 , Technische Universität Darmstadt.

Stephanie Heitel (2010): Stadtrendite durch Wohnungsunternehmen – Analyse der Komponenten und Quantifizierungsmethoden. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 22 , Technische Universität Darmstadt.

Arbeitskreis PPP im Management öffentlicher Immobilien im BPPP e.V. (2010): Arbeitspapier und Handlungsempfehlungen – Qualität als kritischer Erfolgsfaktor der Wirtschaftlichkeit von Immobilien. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 23 , Technische Universität Darmstadt.

Stephanie Heitel, Moritz Lohse, Michael Zahn, Andreas Pfnür, Manuela Damianakis (2011): Wohnungswirtschaft im Wandel: Möglichkeiten und Grenzen öffentlicher Finanzierung in der Wohnraumversorgung. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 24 , Technische Universität Darmstadt.

Dirk Krupper (2011): Immobilienproduktivität: Der Einfluss von Büroimmobilien auf Nutzerzufriedenheit und Produktivität. Eine empirische Studie am Beispiel ausgewählter Bürogebäude der TU Darmstadt. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 25.

Damir Janßen-Tapken (2011): Einsatz und Nutzen von ERP-Systemen im CREM – Eine empirische Studie am Beispiel des SAP ERP-Systems. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 26 , Technische Universität Darmstadt.

Stephanie Heitel, Annette Kämpf-Dern, Andreas Pfnür (2012): Nachhaltiges Management von Stakeholderbeziehungen kommunaler Wohnungsunternehmen. Eine empirische Untersuchung am Beispiel der bauverein AG Darmstadt. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 27 , Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Nikolas Müller (2013): Energetische Gebäudesanierung in Deutschland, Studie Teil II: Prognose der Kosten alternativer Sanierungsfahrpläne und Analyse der finanziellen Belastungen für Eigentümer und Mieter bis 2050. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 28 , Technische Universität Darmstadt.

Sigrun Lüttringhaus (2014): Outsourcing des Propertymanagements als Professional Service. Zusammenfassung der Ergebnisse der empirischen Untersuchung. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 29 , Technische Universität Darmstadt.

Kevin Meyer, Andreas Pfnür (2015): Kognitive verzerrte Entscheidungen als Ursache für Ineffizienzen in der Immobilienprojektentwicklung. Managementorientierte Fassung der Ergebnisse einer empirischen Studie. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 30 , Technische Universität Darmstadt.

Tobias Just, Andreas Pfnür, Christian Braun (2016): Aurelis-Praxisstudie: Wie Corporates die Märkte und das Management für produktionsnahe Immobilien einschätzen. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 31 , Technische Universität Darmstadt.

Nikolas D. Müller, Andreas Pfnür (2016): Wirtschaftlichkeitsberechnungen bei verschärften energetischen Standards für Wohnungsneubauten aus den Perspektiven von Eigentümern und Mietern – Methodisches Vorgehen und Fallbeispiel. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 32 , Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Bernadetta Winiewska, Bettina Mailach, Bert Oschatz (2016): Dezentrale vs. zentrale Wärmeversorgung im deutschen Wärmemarkt – Vergleichende Studie aus energetischer und ökonomischer Sicht. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 33 , Technische Universität Darmstadt.

Nikolas D. Müller, Andreas Pfnür (2017): Konzeptionelle Ansätze zur Umsetzung der Energiewende im Gebäudesektor – Systematisierung und Diskussion alternativer Steuerungsindikatoren für die Energie- und Klimapolitik im Gebäudesektor. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 34 , Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Julian Seger (2017): Produktionsnahe Immobilien. Herausforderungen und Entwicklungsperspektiven aus Sicht von Corporates, Investoren und Dienstleistern. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 35 , Technische Universität Darmstadt.

Wenke Bengtsson, Andreas Pfnür (2018): Unrealistic optimism in the financing of large infrastructure projects in Europe - Results of a survey among private investors, public investors, and lenders. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 36 , Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Benjamin Wagner (2018): Transformation der Immobilienwirtschaft - Eine empirische Studie deutscher immobilienwirtschaftlicher Akteure. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 37 , Technische Universität Darmstadt.

Anne Dörr, Andreas Pfnür (2019): Auswahlprozess für eine Abwicklungsform bei Neubauten durch Non-Property Companies - Eine empirische Studie zu den Entscheidungskriterien und deren Gewichtung bei deutschen Unternehmen In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 38 , Technische Universität Darmstadt.

Felix Gauger, Andreas Pfnür, Jan Skarabi (2020): Arbeitswelten im Wandel: Coworking Spaces - Eine empirische Befragung der Eigenschaften und Nutzerpräferenzen von Coworking Spaces In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 39 , Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür (2020): ZIA-CREM-Studie 2020 - Die Rolle der öffentlichen Hand in der immobilienwirtschaftlichen Transformation deutscher Unternehmen. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 40 , Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Felix Gauger, Yassien Bachtal und Benjamin Wagner (2021): Home- office im Interessenkonflikt. Ergebnisbericht einer empirischen Studie. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 41 , Technische Universität Darmstadt.

Yassien Bachtal (2021): Work organization and work psychology theories and models in the context of Work from Home – A literature-based overview. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 42 , Technische Universität Darmstadt.

Benjamin Wagner (2021): Strukturelle Veränderungen und Unternehmensanpassungen in der strategischen Managementforschung – Eine literaturbasierte Herleitung eines forschungsleitenden Begriffsverständnisses der immobilienwirtschaftlichen Transformation. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 43, Technische Universität Darmstadt.

Klarissa Klotschke, Benjamin Wagner, Andreas Pfnür (2022): Potenzials and challenges of agile project management in real estate development. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 44, Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Yassien Bachtal, Kyra Voll und Felix Gauger (2022): Ökologische Nachhaltigkeit als Treiber der Transformation des Wohnens in Deutschland – Empirische Studie bei privaten Haushalten. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 45, Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Kyra Voll, Yassien Bachtal und Fabian Lachenmayer (2023): So wohnen wir in Zukunft: Wie die Digitalisierung das Wohnen verändert – Empirische Studie bei privaten Haushalten. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 46, Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Martin Christian Höcker (2023): Bürogebäude im Interessenkonflikt der Beschäftigten – Ergebnisse einer empirischen Befragung deutscher Büroarbeitenden. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 47, Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Jonas Rau (2023): Transformation deutscher Innenstädte aus Sicht der Eigentümer. Eine systematische Literaturanalyse. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 48, Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Fabian Lachenmayer, Yassien Bachtal und Kyra Voll (2023): So wohnen wir in Zukunft: Wie der soziodemografische Wandel das Wohnen verändert – Empirische Studie bei privaten Haushalten. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 49, Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Kyra Voll, Martin Christian Höcker und Yassien Bachtal (2023): Von der Pandemienotlösung zum Konzept multilokaler Arbeit – Empirische Studie zu den Erfahrungen der Beschäftigten für eine Zukunft an verteilten Arbeitsorten. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 50, Technische Universität Darmstadt.

Lukas Heidt (2023): Discussion Paper: Remote Work Konzepte - Definition und mögliche Klassifizierung. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 51, Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Jonas Rau (2024a): Transformation der Innenstädte – Empirische Studie bei privaten Haushalten. Teil I: Nutzungskonzepte deutscher Innenstädte. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 52, Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Jonas Rau (2024b): Transformation der Innenstädte – Empirische Studie bei privaten Haushalten. Teil II: Bürgerpräferenzen zur Transformation des Innenstadtquartiers und -immobilien. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 53, Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Fabian Lachenmayer, Yassien Bachtal (2024): Stadt-Land-Vorstadt: Wie die Neubewertung der Urbanität das Wohnen verändert – Empirische Studie bei privaten Haushalten. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 54, Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Fabian Lachenmayer, Valentin Liebhart, Yassien Bachtal (2024): So wohnen wir in Zukunft: Wie staatliche Interventionen das Wohnen verändern – Empirische Studie bei privaten Haushalten. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 55, Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Yassien Bachtal, Fabian Lachenmayer und Kyra Voll (2024): So wohnen wir in Zukunft: Eine Metaanalyse zur Transformation des Wohnens in Deutschland. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 56, Technische Universität Darmstadt.

Andreas Pfnür, Maria Günther, Martin Christian Höcker, Kyra Voll, Florian Krainer, Marcello Zhang (2024): CREM 2024: Aktuelle Situation und Zukunftsperspektiven deutscher Corporates. In: Andreas Pfnür (Hrsg.), Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 57, Technische Universität Darmstadt.