Yaron Grüter

23-062-516

Bachelorstudium Sport, Bewegung und Gesundheit

Alltagsmobilität und Luftverschmutzung bei COPD: Eine Analyse der separaten und kombinierten Effekte auf die isometrische Quadrizepskraft

Bachelorarbeit

vorgelegt am Departement für Sport, Bewegung und Gesundheit

der Universität Basel

Projekt zur Bachelorarbeit

INCLUDE | Biologisches und soziales Geschlecht an der Schnittstelle von körperlicher Aktivität und Luftverschmutzung

Gutachter: Prof. Dr. Sarah Koch

Basel, Juni 2026

Abstract

Hintergrund: Die periphere Muskelschwäche stellt eine systemische Manifestation der chronisch obstruktiven Lungenerkrankung (COPD) dar. Während körperliche Aktivität als schützend gilt, wird Luftverschmutzung als potenzieller Risikofaktor für muskuläre Dysfunktionen diskutiert. Ziel dieser Arbeit war es, den separaten und kombinierten Effekten von Alltagsmobilität und verkehrsbedingter Luftverschmutzung auf isometrische Quadrizepskraft bei Patientinnen und Patienten mit COPD zu untersuchen.

Methodik: In einer Querschnittsanalyse wurden die Baseline-Daten von 104 COPD-Patienten aus der Subkohorte Barcelona des europäischen Mobilise-D-Projekts ausgewertet**.** Die Alltagsmobilität wurde objektiv via Akzelerometrie erfasst, während die chronische Schadstoffbelastung adressbezogen über ein Landnutzungsregressionsmodell geschätzt wurde. Die isometrische Quadrizepskraft wurde mittels Kraftmessgerät standardisiert erfasst. Die Überprüfung der Haupteffekte erfolgte mittels multivariabler linearer Regressionsmodelle unter Adjustierung ausgewählter Kovariaten.

Ergebnisse: In den deskriptiven Rohdaten zeichneten sich zunächst tendenzielle Kraftvorteile bei hochaktiven sowie stärker exponierten Patienten ab. Dieser erste Eindruck relativierte sich jedoch nach der statistischen Adjustierung für relevante Kovariaten erheblich. Weder die körperliche Aktivität ($\beta = -4.92$; $p = 0.714$) noch die chronische Schadstoffbelastung ($\beta = 6.57$; $p = 0.586$) wiesen einen statistisch signifikanten Effekt auf die Quadrizepskraft auf. Beide Einflussfaktoren verfehlten das Signifikanzniveau deutlich. Auch die Subgruppenvergleiche der kombinierten Expositionsmatrix verfehlten das Signifikanzniveau deutlich (alle $p > 0.28$). Die in den Rohdaten beobachteten Unterschiede erwiesen sich als durch biologische Determinanten getriebene Scheinkorrelationen.

Schlussfolgerung: Alltägliche Gehaktivität stellt eine submaximale Ausdauerbelastung dar. Als solche erzeugt sie keinen mechanischen Reiz, der hoch genug wäre, um die isometrische Maximalkraft der Oberschenkelmuskulatur bei Personen mit COPD in relevantem Masse zu beeinflussen. Das Fehlen nachweisbar negativer Schadstoffeffekte verweist auf eine grundlegende methodische Schwäche ausschliesslich wohnortbasierter Expositionsmodelle. Diese sind nicht in der Lage, individuelle Belastungsunterschiede im Alltag hinreichend genau abzubilden. Um peripherer Muskelatrophie wirksam entgegenzuwirken, ist die strukturierte Einbindung von spezifischem Krafttraining unabdingbar.

Inhaltsverzeichnis

Abstract 2
Inhaltsverzeichnis 3
Tabellenverzeichnis 5
Abbildungsverzeichnis 6
1 Einleitung 7
1.1 Krankheitsbild und Klassifikation von COPD 7
1.2 Pathophysiologie der peripheren Muskelschwäche bei COPD 8
1.2.1 Strukturelle und metabolische Veränderungen 8
1.2.2 Teufelskreis der Inaktivität 9
1.2.3 Systemische Entzündungsprozesse 9
1.3 Rolle der körperlichen Aktivität 10
1.4 Luftverschmutzung als umweltbedingter Risikofaktor 10
1.5 Abgrenzung 11
1.6 Fragestellung und Hypothesen 11
2 Methoden 12
2.1 Studiendesign und Studienteilnehmende 12
2.2 Untersuchungsverfahren und Instrumente 14
2.2.1 Durchschnittliches Gehaktivität 14
2.2.2 Durchschnittliche Schadstoffkonzentration 14
2.2.3 Ergebnisvariablen 14
2.2.4 Weitere Variablen 15
2.3 Datenauswertung 16
2.3.1 Datenbeschreibung 16
2.3.2 Statistische Datenauswertung 17
3 Ergebnisse 18
3.1 Separate Effekte von körperlicher Aktivität und Luftverschmutzung 18
3.2 Kombinierte Effekte von körperlicher Aktivität und Luftverschmutzung 21
4 Diskussion 22
4.1 Zusammenfassung der Hauptergebnisse 22
4.2 Interpretation der separaten und kombinierten Effekte 22
4.2.1 Körperliche Aktivität und isometrische Quadrizepskraft 22

4.2.2 Luftverschmutzung und isometrische Quadrizepskraft 23
4.2.3 Kombinierte Effekte 24
4.3 Bezug zum aktuellen Forschungsstand 24
4.4 Stärken und Limitationen 25
4.4.1 Stärken der Untersuchung 25
4.4.2 Limitationen der Untersuchung 26
4.5 Fazit 26
5 Literaturverzeichnis 28
Selbstständigkeitserklärung / Autorenrechte 30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Stichprobenbeschreibung 12
Tabelle 2:Weitere Variablen 15
Tabelle 3: Ergebnisse der multivariablen linearen Regressionsanalysen für die separaten Effekte von körperlicher Aktivität auf die Quadrizepskraft. 18
Tabelle 4: Ergebnisse der multivariablen linearen Regressionsanalysen für die separaten Effekte von Luftverschmutzung (Black Carbon) auf die Quadrizepskraft. 20
Tabelle 5: Ergebnisse des multivariablen linearen Regressionsmodells für die kombinierten Effekte der 2x2-Expositionsmatrix 21

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messstuhl zur Erfassung der maximalen isometrischen Muskelkraft des Quadrizeps 15
Abbildung 2: Modell mit dem Vergleich der isometrischen Quadrizepskraft zwischen Patienten mit niedriger und hoher täglicher Schrittzahl. 19
Abbildung 3: Modell mit dem Vergleich der isometrischen Quadrizepskraft bei geringer und erhöhter Luftverschmutzung durch Black Carbon 20
Abbildung 4: Modell mit den kombinierten Effekten von körperlicher Aktivität und Luftverschmutzung auf die isometrische Quadrizepskraft. 22

1 Einleitung

Die chronisch obstruktive Lungenerkrankung (COPD) stellt global eine der führenden Ursachen für Mortalität und Morbidität dar und ist klinisch durch respiratorische Symptome sowie eine fortschreitende, meist irreparable Einschränkung der Atemwege gekennzeichnet (Agustí et al., 2023). Obwohl COPD hauptsächlich die Atemwege betrifft, betrachtet man sie in der modernen Medizin als eine Erkrankung, die den gesamten Körper beeinflusst und auch ausserhalb der Lunge Beschwerden verursachen kann. (Barnes & Celli, 2009). Eine der zentralen systemischen Manifestationen stellt die periphere Muskelschwäche dar. Besonders häufig betroffen sind die Muskeln der unteren Extremitäten, insbesondere der vierköpfige Oberschenkelmuskel. Der damit verbundene strukturelle und funktionelle Muskelabbau entsteht durch ein komplexes Zusammenspiel verschiedener pathophysiologischer Faktoren. Für die betroffenen Personen führt dies zu einer verminderten körperlichen Leistungsfähigkeit sowie zu erheblichen Einschränkungen der Mobilität im Alltag (Maltais et al., 2014). In der Folge kann sich ein sich selbst verstärkender Kreislauf entwickeln. Belastungsinduzierte Atemnot veranlasst viele Patientinnen und Patienten dazu, körperliche Aktivitäten zu reduzieren oder ganz zu vermeiden. Die daraus resultierende Inaktivität fördert wiederum den weiteren Kraftverlust, wodurch die körperliche Belastbarkeit zusätzlich sinkt. Die periphere Muskelschwäche wirkt sich daher nicht nur negativ auf die gesundheitsbezogene Lebensqualität aus, sondern gilt auch als unabhängiger Prädiktor für Exazerbationen und eine erhöhte Mortalität bei COPD. (Swallow et al., 2007).

1.1 Krankheitsbild und Klassifikation von COPD

Um diese systemische Erkrankung präzise einzuordnen, sind sowohl eine fundierte Analyse epidemiologischer Daten als auch eine genaue Kenntnis der zugrundeliegenden diagnostischen Kriterien erforderlich. Die COPD belastet neben dem Lungengewebe auch die globalen Gesundheitssysteme in erheblichem Masse auf sozioökonomischer Ebene (Agustí et al., 2023). Wenn man sich die Pathophysiologie hinter der Krankheit anschaut, liegt eine chronische Entzündungsreaktion der Atemwege vor, die primär durch inhalative Belastung schädlicher Partikel oder Gase induziert wird (Agustí et al., 2023). Die strukturellen Veränderungen umfassen eine Erkrankung der kleinen Atemwege und eine irreversible Zerstörung des Alveolarraums, was zu einem elastischen Rückstellungskraft der Lunge und einer Hyperinflation führen kann (Agustí et al., 2023).

Die Diagnose von COPD sowie die Bestimmung des Erkrankungsschweregrads stützen sich wesentlich auf die spirometrische Lungenfunktionsdiagnostik (Agustí et al., 2023). Dabei kommt dem forcierten exspiratorischen Volumen in der ersten Sekunde (FEV1), angegeben als prozentualer Anteil des Sollwerts (FEV1 % predicted), sowie der forcierten Vitalkapazität (FVC) eine diagnostisch zentrale Bedeutung zu. Unterschreitet der Quotient aus FEV1 und FVC nach bronchodilatatorischer Intervention den definierten Grenzwert von 0.70, gilt eine andauernde Obstruktion der Atemwege als klinisch gesichert (Agustí et al., 2023). In der historischen Klassifikation wurde der Schweregrad der Erkrankung allein auf Grundlage spirometrischer Messwerte in die vier GOLD-Kategorien eingeteilt. Die Stufe GOLD 1 beschreibt dabei

eine milde Obstruktion mit einem FEV1-Wert von mindestens 80 % des Sollwerts, während GOLD 4 eine sehr schwere Obstruktion mit einem FEV1-Wert von unter 30 % kennzeichnet.

In der heutigen pneumologischen Praxis hat sich dieses rein funktionelle Schema zu einer kombinierten Beurteilungsmethode weiterentwickelt (Agustí et al., 2023). Dazu wurde das sogenannte GOLD-ABE-Klassifikationsschema etabliert, weil die spirometrischen Messwerte allein unzureichend mit der subjektiven Symptomlast, der Lebensqualität und dem Exazerbationsrisiko der Patienten korrelieren (Agustí et al., 2023). Bei diesem Schema werden Patienten anhand zweier klinischen Dimensionen eingeteilt: Ausprägung der Symptome und Historie der Exazerbationen in den vergangenen 12 Monaten (Agustí et al., 2023). Ersteres wird über validierte Fragebögen wie die Dyspnoe-Skala oder den COPD Assessment Test (CAT) erfasst. Die abschliessende Einteilung unterscheidet die Gruppen A, B und E (Agustí et al., 2023):

- Gruppe A: geringe Symptomlast, niedriges Exazerbationsrisiko
- Gruppe B: hohe Symptomlast, niedriges Exazerbationsrisiko
- Gruppe E: hohes Exazerbationsrisiko, unabhängig von der Symptomprävalenz)

1.2 Pathophysiologie der peripheren Muskelschwäche bei COPD

In der Pneumologie und Sportwissenschaft ist unbestritten, dass es sich bei der chronisch obstruktiven Lungenerkrankung um eine komplexe Systemerkrankung handelt (Barnes & Celli, 2009; Wouters et al., 2002). Eine der klinisch bedeutsamen Manifestation ist die periphere Muskelschwäche, welche vorwiegend die Kraft- und Ausdauerleistungsfähigkeit der unteren Extremitäten beeinträchtigt (Maltais et al., 2014). Im Zentrum der Forschung steht hierbei der vierköpfige Oberschenkelmuskel, da dessen Funktion die Alltagsmobilität, die gesundheitsbezogene Lebensqualität und die Rate an Hospitalisierungen relevant beeinflusst (Maltais et al., 2014; Watz et al., 2014). Arbeiten wie jene von Swallow et al., (2007) konnten zeigen, dass die maximale isometrische Quadrizepskraft ein kritischer Prädiktor für die Gesamtmortalität der Betroffenen ist. Der Abbau der Skelettmuskulatur ist das Resultat eines multifaktoriellen Zusammenspiels. Dieses setzt sich aus strukturellen Veränderungen auf Hautebene, humoralen Treibern sowie lokalen Dekonditionierungsprozessen zusammen (Maltais et al., 2014).

1.2.1 Strukturelle und metabolische Veränderungen

Beim Fokus auf die zelluläre Ebene zeigt sich, dass die muskuläre Dysfunktion bei COPD tiefgreifende Veränderungen der Skelettmuskelarchitektur und des metabolischen Profils beeinflusst. (Maltais et al., 2014). Das prägnanteste Phänomen beschreibt der sogenannte Fiber-Type-Shift, auch Muskelfasertransformation genannt (Maltais et al., 2014). Bei gesunden Personen liegt im Oberschenkelmuskel ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Typ-1-Muskelfasern und Typ-II-Muskelfasern vor (Gollnick et al., 1972). Anders sieht es bei COPD-Patientinnen und Patienten aus, dort kommt es zu einer Abnahme des Anteils an Typ-1-Fasern bei einer relativen Zunahme von Typ-II-Fasern, insbesondere des Subtyps IIx. Aufgrund dieser strukturellen Transformation reduziert sich die kapilläre Dichte pro Muskelfaser, was die Diffusionsstrecke für Sauerstoff verlängert und die kapilläre Perfusion unter Belastung einschränkt. Begleitet wird diese Fasertypenverteilung durch eine ausgeprägte mitochondriale Dysfunktion.

Die restlichen Mitochondrien weisen strukturellen Schäden sowie eine herabgesetzte Aktivität des Zitronensäurezyklus und der oxidativen Phosphorylierung auf. Die biochemische Konsequenz ist eine Reduktion der aeroben Kapazität des Muskelgewebes. Dies führt dazu, dass der Muskel bereits bei submaximalen Alltagsbelastungen zu einem verfrühten Übergang in den anaeroben Stoffwechsel schaltet, was zu einer Laktatansammlung und einer gesteigerten muskulären Ermüdbarkeit führt. (Maltais et al., 2014)

1.2.2 Teufelskreis der Inaktivität

Durch die Reduktion der mechanischen Belastung bauen sich die Muskeln ab, weil sie zu wenig bewegt und belastet werden (Maltais et al., 2014). Daraus kann der Teufelskreis der Inaktivität entstehen (Maltais et al., 2014). Denn wer sich weniger bewegt, verliert Muskelmasse und wer weniger Muskelmasse hat, bewegt sich noch weniger, was den Muskelabbau weiter vorantreibt (Maltais et al., 2014). Die Alltagsmobilität sinkt im Vergleich zu gesunden Gleichaltrigen drastisch (Pitta et al., 2005). Hinzu kommt, dass die Lungenfunktion bei den Betroffenen zunehmend eingeschränkt ist, was bereits bei moderaten Belastungen zu Atemnot führen kann, die als belastend erlebt wird (Watz et al., 2014). Um diesem unangenehmen Gefühl zu entgehen, neigen viele Patientinnen und Patienten dazu, körperliche Aktivität zu meiden (Watz et al., 2014). Die dabei resultierende Immobilisation entzieht der Oberschenkelmuskulatur den nötigen Reiz, um die Muskelproteinsynthese und die neuromuskuläre Rekrutierung aufrecht zu halten (Maltais et al., 2014). Insbesondere die schnell zuckenden Typ-II-Muskelfasern benötigen einen stärkeren mechanischen Reiz, um ihre Kapazität aufrechterhalten zu können (Maltais et al., 2014). Da alltägliche Bewegungsreize nicht ausreichen, um die Muskulatur ausreichend zu stimulieren, führt die fortschreitende Schonung unweigerlich zu einem messbaren Kraftverlust (Maltais et al., 2014). In der Praxis wird dieser Kraftverlust häufig anhand der isometrischen Maximalkraft gemessen (Maltais et al., 2014)

1.2.3 Systemische Entzündungsprozesse

Die periphere Muskelschwäche lässt sich nicht allein auf körperliche Inaktivität zurückführen, sondern wird zusätzlich durch krankheitsbedingte Prozesse verstärkt, die im gesamten Körper ihren Einfluss haben können (Maltais et al., 2014; Wouters et al., 2002). Die durch jahrelange Schadstoffinhalation ausgelöste Entzündungsreaktion in den Atemwegen bleibt dabei nicht auf die Lunge begrenzt und tritt in den systemischen Blutkreislauf über. Dieses Phänomen wird als Spill-over bezeichnet (Barnes & Celli, 2009; Wouters et al., 2002). Der Spill-over-Effekt hat eine dauerhaft erhöhte Konzentration entzündungsfördernder Botenstoffe im Blut zur Folge (Barnes & Celli, 2009; Wouters et al., 2002). Duch die zirkulierenden Entzündungsmediatoren werden im Muskelgewebe spezifische Signalwege aktiviert, die das Gleichgewicht zwischen Proteinanabolismus und Proteinkatabolismus wesentlich stören (MacNee, 2005; Maltais et al., 2014). Begleitet wird dieser Prozess zusätzlich durch oxidativen Stress, der sowohl im Muskelgewebe als auch im gesamten Körper auftritt (MacNee, 2005). Die dabei entstehende Überproduktion reaktiver Sauerstoffspezies schädigt die Muskelzelle auf mehreren Stufen gleichzeitig. Sie verändert die chemische Struktur muskulärer Proteine und Fette, greift die DNA der Mitochondrien an und vermindert die Empfindlichkeit der Muskelfasern gegenüber Kalziumionen

(MacNee, 2005; Maltais et al., 2014). Kalzium wirkt als zentrales Bindeglied zwischen dem nervalen Signal und der eigentlichen Muskelkontraktion, deswegen wird durch diese Beeinträchtigung die Fähigkeit des Muskels, akut Kraft zu erzeugen, direkt gehemmt (MacNee, 2005; Maltais et al., 2014).

1.3 Rolle der körperlichen Aktivität

Um dem fortschreitenden Verlust an Muskelkraft und dem daraus resultierenden Teufelskreis aus körperlicher Inaktivität und sinkender Leistungsfähigkeit entgegenzuwirken, gilt regelmässige körperliche Aktivität als wichtige nicht pharmakologischen Massnahme in der Therapie von COPD-Patientinnen und -Patienten (Watz et al., 2014). Besonders das Gehen im Alltag stellt eine leicht zugängliche und alltagsnahe Bewegungsform dar, die sich objektiv anhand der täglichen Schrittzahl erfassen lässt (Pitta et al., 2005). Aufgrund ihrer einfachen Umsetzbarkeit und ihrer positiven gesundheitlichen Effekte wird sie als eine wichtige Komponente der Bewegungstherapie angesehen. Eine Vielzahl an Studien zeigen, dass ein höheres Mass an täglicher Aktivität mit einer verbesserten funktionellen Leistungsfähigkeit sowie dem Erhalt der peripheren Muskelkraft verbunden ist (Waschki et al., 2011). Hinzu kommt, dass ein aktiver Lebensstil mit einer geringeren Häufigkeit von Exazerbationen und Hospitalisierungen einher geht (Garcia-Aymerich et al., 2006). Trotz dieser zahlreichen Vorteile fällt es viele Patienten schwer, ein ausreichendes Aktivitätsniveau langfristig aufrechtzuhalten. Eine zentrale Ursache hierfür sind die krankheitsspezifischen Symptome von COPD. Die belastungsinduzierte Atemnot und die erhöhte muskuläre Ermüdbarkeit können erhebliche Barrieren für körperliche Aktivität darstellen (Watz et al., 2014). Im Vergleich zu gesunden Gleichaltrigen weisen viele Patientinnen und Patienten daher ein deutlich reduziertes Aktivitätsniveau auf (Pitta et al., 2005). Vor diesem Hintergrund sind günstige Umgebungsbedingungen von besonderer Bedeutung, da sie die sichere und effektive Durchführung körperlicher Aktivitäten im Freien unterstützen und somit einen wichtigen Beitrag zur Förderung eines aktiven Lebensstils leisten können.

1.4 Luftverschmutzung als umweltbedingter Risikofaktor

Körperliche Aktivität im Freien stellt für COPD-Patientinnen und-Patienten nicht nur einen therapeutischen Grundpfeiler dar, sondern gleichzeitig eine potenzielle Quelle gesundheitlicher Risiken. In urbanen Umgebungen spielt dabei die Exposition gegenüber verkehrsbedingter Luftverschmutzung eine zentrale, insbesondere gegenüber Black Carbon (BC) (DeFlorio-Barker et al., 2020). Bei diesem Schadstoff handelt es sich um ein kohlenstoffhaltiges Aerosol, das vorwiegend bei der unvollständigen Verbrennung fossiler Brennstoffe entsteht. Diese Partikel können aufgrund ihres geringen aerodynamischen Durchmessers tief in die Atemwege eindringen und die alveoläre Schranke überwinden (Fischer et al., 2011). Die Inhalation verkehrsbedingter Schadstoffe kann bei Betroffenen mit COPD eine Zunahme respiratorischer Symptome auslösen. Husten, Atemnot und Giemen sind typische Beschwerden die in der Nähe vielbefahrener Strassen auftreten können (Sinharay et al., 2018). Über diese lokalen Effekte hinaus löst die Schadstoffexposition eine systemische Reaktion aus, die oxidativen Stress und Inflammation umfasst (MacNee, 2005). Die dabei freigesetzten zirkulierenden Immunbotenstoffe aktivieren Entzündungsprozesse, die weit über das respiratorische System hinausreichen und als

wesentliche Ursache für den Abbau der peripheren Skelettmuskulatur gelten (Wouters et al., 2002). Hieraus ergibt sich ein klinisch bedeutsames Paradoxon. Tägliche Gehaktivität ist für den Erhalt der körperlichen Leistungsfähigkeit bei COPD unabdingbar. Aktuelle experimentelle Untersuchungen zeigen jedoch, dass bereits eine kurzzeitige Exposition gegenüber Verkehrsabgasen während des Gehens die positiven kardiopulmonalen Effekte der Bewegung erheblich abschwächen kann (Sinharay et al., 2018). Es besteht daher die begründete Annahme, dass eine hohe Schadstoffbelastung während körperlicher Aktivität jene systemischen Entzündungswege aktiviert, die dem therapeutischen Nutzen der Bewegung entgegenwirken und den muskulären Abbau weiter begünstigen (DeFlorio-Barker et al., 2020; Sinharay et al., 2018)

1.5 Abgrenzung

Obwohl die negativen Auswirkungen von Luftschadstoffen auf die respiratorische Gesundheit gut dokumentiert sind, besteht in der aktuellen Literatur eine relevante Forschungslücke. Es fehlen Erkenntnisse über die kombinierten Effekte von Umweltbelastungen und alltäglicher Mobilität auf die extrapulmonalen Manifestationen von COPD. Experimentelle Studien wie jene von Sinharay et al. (2018) lieferten wichtige Hinweise auf die akute Beeinträchtigung kardiopulmonaler Parameter während kurzzeitiger Schadstoffexposition. Sie bilden jedoch nicht das habituelle Aktivitätsverhalten und die chronische Umgebungsexposition der Patientinnen und Patienten in ihrem realen Lebensumfeld ab.

Darüber hinaus konzentrierte sich die bisherige Forschung vorwiegend auf pulmonale Funktionseinschränkungen oder kardiovaskuläre Endpunkte. Die periphere Muskelschwäche gehört zwar zu den gravierendsten systemischen Folgen der COPD und sagt die Mortalität unabhängig voraus, wurde jedoch kaum im Spannungsfeld zwischen protektiver Alltagsaktivität und schädigender Black Carbon Exposition untersucht. Klinische Daten, die diese Interaktion mittels statistischer Verfahren analysieren und gleichzeitig praxisnah abbilden, fehlen weitgehend.

Genau an dieser Schnittstelle setzt die vorliegende Bachelorarbeit an. Durch die Verknüpfung von objektiver Bewegungsmessung, individueller Expositionsbestimmung und peripherer Kraftdiagnostik soll ein Abbild dieser Zusammenhänge dargestellt werden.

1.6 Fragestellung und Hypothesen

Aufbauend auf die im vorigen Abschnitt vorgestellten Forschungslücke ist es das Ziel dieser Arbeit, die kombinierten Zusammenhänge von täglicher körperlicher Aktivität und Luftverschmutzung auf die isometrische Quadrizeps-Muskelkraft bei Menschen mit COPD zu ermitteln. Konkret konzentrieren wir uns auf diese objektive Messung der Beinkraft, um genau zu beschreiben, wie dieser essenzielle physische Leistungsparameter durch regelmässiges Gehen bei Personen mit COPD beeinflusst wird, und um den genauen Einfluss von Russpartikeln (Black Carbon) auf die systemischen und muskulären Mechanismen zu klären, die den Erhalt der Muskelkraft bedingen.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, anhand von klinischen Sekundärdaten der europäischen Mobilise-D-Kohorte, die Zusammenhänge täglicher Gehaktivitäten in verschmutzten Umgebungen auf die isometrische Quadrizepskraft bei Menschen mit COPD zu untersuchen.

- Bestimmung des isolierten Effekts der objektiv gemessenen Schrittzahl auf die isometrische Quadrizeps-Muskelkraft
- Bestimmung des isolierten Effekts der geschätzten täglichen Luftverschmutzung (Russ = Black Carbon) auf die isometrische Quadrizeps-Muskelkraft
- Bestimmung des kombinierten Effekts von täglicher Schrittzahl und Luftverschmutzung auf die isometrische Quadrizeps-Muskelkraft

Ich stelle die Hypothese auf, dass eine höhere tägliche Schrittzahl mit einer besseren Quadrizepskraft assoziiert ist und eine hohe Luftverschmutzung mit einer geringeren Kraft. Bei der Kombination erwarte ich, dass die gesundheitlichen Vorteile einer hohen Gehaktivität die negativen Risiken der Luftverschmutzung überwiegen.

2 Methoden

2.1 Studiendesign und Studienteilnehmende

Die vorliegende Arbeit nutzt ein querschnittliches Beobachtungsstudiendesign und analysiert Daten, die im Rahmen der klinischen Validierungsstudie des Mobilise-D-Projekts erhoben wurden. Für diese spezifische Analyse werden ausschliesslich die Baseline Daten sowie die Daten der ersten Visite herangezogen, welche im Zeitraum von Januar bis September 2021 stattfanden. Im direkten Anschluss an diese Visite wurde die alltägliche Gehaktivität der Teilnehmenden über sieben aufeinanderfolgende Tage unter realen Alltagsbedingungen objektiv gemessen. Parallel dazu wurde die durchschnittliche Belastung durch Black Carbon (BC) am individuellen Wohnort für die zwei Jahre vor dieser Baseline Visite geschätzt, um die langfristige Umweltexposition abzubilden.

Tabelle 1: Stichprobenbeschreibung

Soziodemographische, klinische und funktionelle Baseline-Charakteristika von 104 Patientinnen und Patienten mit COPD in der europäischen klinischen Validierungsstudie Mobilise-D beim Rekrutierungsstandort Barcelona	
Charakteristika	
Alter (Jahre)	67.3±7.3
Biologisches Geschlecht: Frauen	22 (21.2)
Grösse (cm)	167.6±0.1
Gewicht (kg)	79.2±13.1
BMI ($kg \cdot m^{-2}$)	28.2±4.3
BMI Kategorien	
Untergewicht	1 (0.9)
Normalgewicht	24 (23.1)
Übergewicht	43 (41.3)
Adipositas	36 (34.6)

Beschäftigungsstatus (im Ruhestand)	66 (63.5)
Raucherhistorie: Pack-years	49.3 (36-70.4)
Atemnot (mMRC Grad 0-4)	1 (1-2)
HRQoL(CAT score0–40)	12 (8-16)
6MWD (m)	471±112
FEV1 (L)	1.56±0.74
FEV1 (% pred)	54.6±22.0
FVC (L)	3.16±1.02
FVC (% pred)	85.4±20.0
Luftwegverengung (GOLD-Stufe 1–4)	
1	18 (17.3)
2	41 (39.4)
3	31 (29.8)
4	14 (13.5)
GOLD ABE-Klassifikation	
A (1)	29 (27.9)
B (2)	51 (49.0)
E (3)	24 (23.1)
Erfahrungen mit körperlicher Aktivität (C-PPAC-Werte, 0–100)	
Anzahl	72.0±16.1
Schwierigkeitsgrad	78.1±13.3
Gesamtpunktzahl	75.0±12.5
Gehaktivität	8028 (4955-12484)

Die soziodemographischen, klinischen und funktionellen Baseline-Charakteristika der resultierenden Stichprobe am Rekrutierungsstandort Barcelona sind in Tabelle 1 detailliert aufgeführt. Die finale Kohorte umfasst insgesamt 104 Patientinnen und Patienten mit COPD mit einem Durchschnittsalter von 67.3 (± 7.3) Jahren, von denen 21.2 % (n = 22) dem weiblichen Geschlecht angehören. Der mittlere Body-Mass-Index (BMI) liegt bei 28.2 (± 4,3) $kg \cdot m^{-2}$, wobei über 75 % der Betroffenen als übergewichtig oder adipös eingestuft wurden. Die respiratorische Einschränkung zeigt sich in einer mittleren Lungenfunktion (FEV1 % predicted) von 54.6 % (± 22.0 %), was das Kollektiv primär in den moderaten bis schweren Stadien der Atemwegsobstruktion (GOLD-Stufen 2 und 3) verortet. Bezüglich des Bewegungsverhaltens absolvierten die Teilnehmenden im Alltag eine moderate Gehaktivität mit einem Median von 8028 Schritten pro Tag.

2.2 Untersuchungsverfahren und Instrumente

2.2.1 Durchschnittliches Gehaktivität

Die tägliche Gehaktivität wurde mit den tragbaren Beschleunigungssensoren Dynaport (McRoberts, Den Haag, Niederlande) oder Axivity 6 (Newcastle, Vereinigtes Königreich) objektiv erfasst, die die Teilnehmenden über einen Zeitraum von sieben aufeinanderfolgenden Tagen trugen. Eine gültige Messung umfasst mindestens drei Tage, an denen während der Wachzeit die Sensoren über zwölf Stunden lang getragen wurde. Aus den gesammelten Rohdaten der Sensoren wurde algorithmisch die durchschnittliche tägliche Schrittzahl (Schritte/Tag) extrahiert, welche in der vorliegenden Arbeit als kontinuierlicher Hauptindikator für das alltägliche körperliche Aktivitätsniveau dient.

2.2.2 Durchschnittliche Schadstoffkonzentration

Als quantitativer Marker für die verkehrsbedingte Luftverschmutzung diente die individuelle chronische Exposition gegenüber Black Carbon (BC). Die mittlere BC-Konzentration wurde adressbezogen für jede Studienteilnehmerin und jeden Studienteilnehmer in der Einheit Mikrogramm pro Kubikmeter (µg/m³) bestimmt. Die Berechnung bezog sich retrospektiv auf einen Zeitraum von zwei Jahren vor der Baseline-Erhebung (T1) und basierte auf den georeferenzierten Wohnadressen der Probandinnen und Probanden.

Zur Expositionsschätzung wurden validierte Landnutzungsregressionsmodelle (Land Use Regression, LUR) eingesetzt. Diese hochauflösenden Modelle integrieren räumliche Informationen zur urbanen Bebauungsstruktur, zum lokalen Verkehrsaufkommen sowie zu meteorologischen Gegebenheiten und ermöglichen so eine wohnortbezogene Abschätzung der individuellen Luftschadstoffbelastung im Alltag.

2.2.3 Ergebnisvariablen

Die primäre Zielgrösse dieser Untersuchung ist die maximale isometrische Muskelkraft des Quadrizeps (Quadriceps Maximal Voluntary Contraction, QMVC), welche zum Baseline-Zeitpunkt (T1) erfasst wurde. Diese Muskelkraft dient als kontinuierliche Variable und wesentlicher klinischer Indikator für die funktionelle Leistungsfähigkeit des Bewegungsapparates bei COPD-Patienten. Die Erfassung erfolgte gemäss der studieneigenen Standardarbeitsanweisung am dominanten Bein, unter Verwendung eines massgefertigten Messstuhls, der mit einem kalibrierten elektronischen Kraftaufnehmer gekoppelt war. Um die Kraft der Oberschenkelstrecker isoliert zu erfassen und kompensatorische Ausweichbewegungen der Rumpf- und Gesässmuskulatur auszuschliessen, wurden die Probandinnen und Probanden in einer aufrechten Sitzposition positioniert. Hüft- und Kniegelenk wurden dabei auf einen Flexionswinkel von jeweils 90° eingestellt. Das Becken wurde mittels eines unelastischen Gurtes fest an Sitzfläche und Rückenlehne gesichert. Die Arme waren während der gesamten Messung vor der Brust zu verschränken. Die Krafteinleitung in das Dynamometer erfolgte über eine gepolsterte und unelastische Manschette, die exakt am distalen Unterschenkel appliziert wurde.

Der Testablauf begann mit submaximalen Probeversuchen zur Eingewöhnung an das Gerät und den spezifischen Bewegungsablauf. Anschliessend wurden die Teilnehmenden instruiert, gegen

den unüberwindbaren Widerstand des Gurtes eine maximale willkürliche Knieextension auszuführen. Jeder Maximalversuch dauerte drei bis fünf Sekunden, wobei die Studienassistenzen die Teilnehmenden durch standardisierte verbale Instruktionen zur maximalen Ausbelastung motivierten. Zwischen den einzelnen Durchgängen wurde eine Erholungspause von 30 bis 60 Sekunden eingehalten, um muskuläre Ermüdungseffekte zu minimieren. Pro Messkonsultation wurden drei bis fünf Durchgänge absolviert, bis die gemessenen Kraftwerte ein reproduzierbares Plateau erreichten.

Für die statistische Auswertung wurde der höchste, über eine volle Sekunde stabil gehaltene Kraftwert in Kilogramm herangezogen. Da die am Unterschenkel gemessene absolute Kraft massgeblich von den individuellen anatomischen Hebelverhältnissen abhängt, wurde zusätzlich die Hebellänge in Zentimetern dokumentiert. Die Messung erfolgte vom Kniegelenksspalt bis zur Mitte der Kraftmanschette. Aus der Kombination von Maximalkraft und Hebellänge liess sich das mechanische Drehmoment in Newtonmetern berechnen, um eine anatomische Standardisierung der Muskelkraft unabhängig von der individuellen Hebellänge der Patienten darzustellen.



Abbildung 1: Messstuhl zur Erfassung der maximalen isometrischen Muskelkraft des Quadrizeps

2.2.4 Weitere Variablen

Relevante soziodemographische und klinische Variablen wurden zum Baseline-Zeitpunkt (T1) teils über strukturierte, interviewgestützte Fragebögen und teils durch spezifische klinische Tests erhoben.

Tabelle 2:Weitere Variablen

Variablenname	**Variablenbeschreibung**
Alter	Alter der Teilnehmenden

Geschlecht	Biologisches Geschlecht (weiblich/männlich)
Body Mass Index	Körpermasse-Index in kg/m^2
Raucherstatus	Raucherstatus im Monat vor der Untersuchung (ja/nein)
Raucherhistorie	Kumulierter Packungsjahre-Index als Mass für die lebenslange Tabakexposition
Lungenfunktion	Forciertes exspiratorisches Volumen in der 1. Sekunde (FEV1)
Atemnot	modified Medical Research Council (mMRC) Grad (0-4)
Symptomlast	COPD Assessment Test (CAT) Score (0-40)

2.3 Datenauswertung

Für die statistische Analyse und grafische Aufbereitung der Daten wurde die Open-Source-Software R Studio verwendet. Das methodische Vorgehen folgte einer klar strukturierten Abfolge. Das Signifikanzniveau wurde im Voraus auf $\alpha = 0.05$ festgelegt. Folglich gelten alle Ergebnisse mit einem p-Wert unterhalb dieses Schwellenwerts als statistisch signifikant.

2.3.1 Datenbeschreibung

Die deskriptive Analyse diente der Charakterisierung der Studienpopulation zum Baseline-Zeitpunkt (T1). Expositionsvariablen wie die tägliche Schrittzahl und die gemessene Luftverschmutzung unterlagen erfahrungsgemäss einer rechtsschiefen Verteilung. Um Verzerrungen durch Ausreisser zu vermeiden, wurden kontinuierliche Variablen daher primär durch den Median sowie den Interquartilsabstand beschrieben. Kategoriale Variablen wie Geschlecht, Raucherstatus und das Vorhandensein von Komorbiditäten wurden anhand absoluter Häufigkeiten und Prozentsätzen dargestellt.

Zur Maximierung der klinischen Interpretierbarkeit wurden die beiden Hauptexpositionen, die Schrittzahl und die Black-Carbon-Konzentration, zusätzlich anhand ihres jeweiligen Medians dichotomisiert («High» vs. «Low»). Daraus resultierte eine 2×2-Matrix mit vier Subgruppen:

- Niedrige Aktivität / Niedrige Luftverschmutzung (Low-Low)
- Hohe Aktivität / Niedrige Luftverschmutzung (High-Low)
- Niedrige Aktivität / Hohe Luftverschmutzung (Low-High)
- Hohe Aktivität / Hohe Luftverschmutzung (High-High)

Die Charakteristika der Kohorte und insbesondere die isometrische Quadrizepskraft wurden sowohl für das Gesamtkollektiv als auch stratifiziert nach diesen vier Quadranten visuell veranschaulicht.

2.3.2 Statistische Datenauswertung

Die Untersuchung der separaten und kombinierten Effekte des körperlichen Aktivitätsniveaus sowie der Luftverschmutzungsexposition auf die Muskelkraft erfolgte mittels multivariater linearer Regressionsmodelle. Um die etablierte Darstellungsstruktur der zugrundeliegenden Kohortenstudie zu wahren, wurden die beiden kontinuierlichen Expositionsvariablen vorab dichotomisiert. Die Schrittzahl sowie die Black-Carbon-Konzentration wurden jeweils anhand ihres Medians in kategoriale Variablen (hoch vs. niedrig) transformiert. Dies ermöglichte zugleich eine intuitive klinische Interpretation der Ergebnisse. Die primäre Zielgrösse, die isometrische Quadrizepskraft, ging als kontinuierliche Variable in sämtliche Berechnungen ein.

Für die Analyse der isolierten Effekte wurden zwei separate multivariable lineare Regressionsmodelle berechnet. Modell 1 untersuchte den adjustierten Einfluss des Aktivitätsniveaus (hoch vs. niedrig) auf die Quadrizepskraft, während Modell 2 den adjustierten Einfluss der Black-Carbon-Exposition (hoch vs. niedrig) auf die Kraftwerte prüfte. Für jede Exposition wurden der Regressionskoeffizient (β), das zugehörige 95%-Konfidenzintervall (95%-KI) sowie der p-Wert ausgewiesen, wobei die Kategorie mit der jeweils niedrigen Exposition als mathematische Referenzgruppe diente. Zusätzlich wurden zur Veranschaulichung Boxplots erstellt, welche die bereinigten Kraftunterschiede zwischen den beiden Expositionsstufen visualisieren.

Zur Analyse der kombinierten Effekte wurde ein drittes multivariates lineares Regressionsmodell berechnet. Hierfür wurde eine kombinierte Variable gebildet, welche die Teilnehmenden anhand der Median-Splits in eine 2×2-Matrix mit vier spezifischen Subgruppen unterteilte. Das Modell untersuchte, inwiefern sich die adjustierten Mittelwerte der Quadrizepskraft zwischen diesen vier Quadranten unterschieden. Als feste Referenzkategorie diente dabei entweder die Gruppe mit der vermeintlich günstigsten gesundheitlichen Konstellation (high-low) oder jene mit der geringsten Gesamtexposition (low-low). Die Ergebnisse wurden in einer separaten Tabelle unter Angabe der Regressionskoeffizienten, der 95%-Konfidenzintervalle sowie der p-Werte für die einzelnen Quadranten relativ zur Referenzgruppe berichtet. Ergänzend veranschaulichten Boxplots die Verteilung der Quadrizepskraft über alle vier Expositionskategorien hinweg.

Um systematische Verzerrungen zu minimieren, wurden alle drei Regressionsmodelle standardmässig um vier vorab definierte soziodemographische und klinische Kovariaten adjustiert. Die Auswahl dieser Variablen begründet sich in ihrem in der Literatur nachgewiesenen, simultanen Einfluss auf die Zielgrössen. Erstens determinieren das Alter und das biologische Geschlecht entscheidend die absolute Skelettmuskelmasse und die isometrische Maximalkraft (Maltais et al., 2014), während sie gleichzeitig die habituelle körperliche Aktivität beeinflussen (Watz et al., 2014). Zweitens wurde die Atemwegsobstruktion in Form des FEV1 (% predicted) in die Modelle aufgenommen, da die Lungenfunktion direkt mit der krankheitsbedingten Inaktivität sowie dem Schweregrad der systemischen Inflammation korreliert (Agustí et al., 2023).

Drittens wurde die lebenslange Tabakexposition aufgenommen. Denn chronischer Nikotinkonsum ist nicht nur die Hauptursache von COPD, sondern löst als stärkster inhalativer Schadstoff massiven oxidativen Stress aus, welcher den Muskelkatabolismus unabhängig von der verkehrsbedingten Luftverschmutzung am Wohnort vorantreibt (MacNee, 2005; Wouters et al., 2002). Die Überprüfung der Modellannahmen erfolgte anschliessend anhand von Quantil-Quantil-Diagrammen zur Beurteilung der Residualverteilung sowie des Varianzinflationsfaktors, um auszuschliessen, dass die unabhängigen Variablen zu stark miteinander korrelieren.

3 Ergebnisse

3.1 Separate Effekte von körperlicher Aktivität und Luftverschmutzung

Zur Überprüfung der zugrundeliegenden Hypothesen wurden zwei separate multivariable lineare Regressionsmodelle berechnet. Das erste untersuchte, ob eine höhere tägliche Schrittzahl mit einer besseren isometrischen Quadrizepskraft assoziiert war. Das zweite Modell prüfte den vermuteten negativen Einfluss einer hohen Luftverschmutzungsexposition auf die Muskelkraft. Beide Modelle wurden unter Adjustierung für vordefinierte Kovariaten berechnet.

Tabelle 3: Ergebnisse der multivariablen linearen Regressionsanalysen für die separaten Effekte von körperlicher Aktivität auf die Quadrizepskraft.

Expositionsvariable	**Gruppe**	Absolute Quadrizeps-kraft (Nm) [IQR]	Koeffizient (β)	95% - KI	p-Wert
Körperliche Aktivität (Schrittzahl)	**Low**	113.9 [81.7]	Referenz	Referenz	Referenz
	High	125.5 [61.6]	-4.92	[-31.5, 21.7]	0.714

Anmerkungen: Nm = Newtonmeter; β = unstandardisierter Regressionskoeffizient; 95%-KI = 95%-Konfidenzintervall; p = p-Wert; IQR = Interquartilsabstand. Das Modell wurde adjustiert für: Alter, Geschlecht, Raucherhistorie (Pack-years) und FEV1 (% predicted).

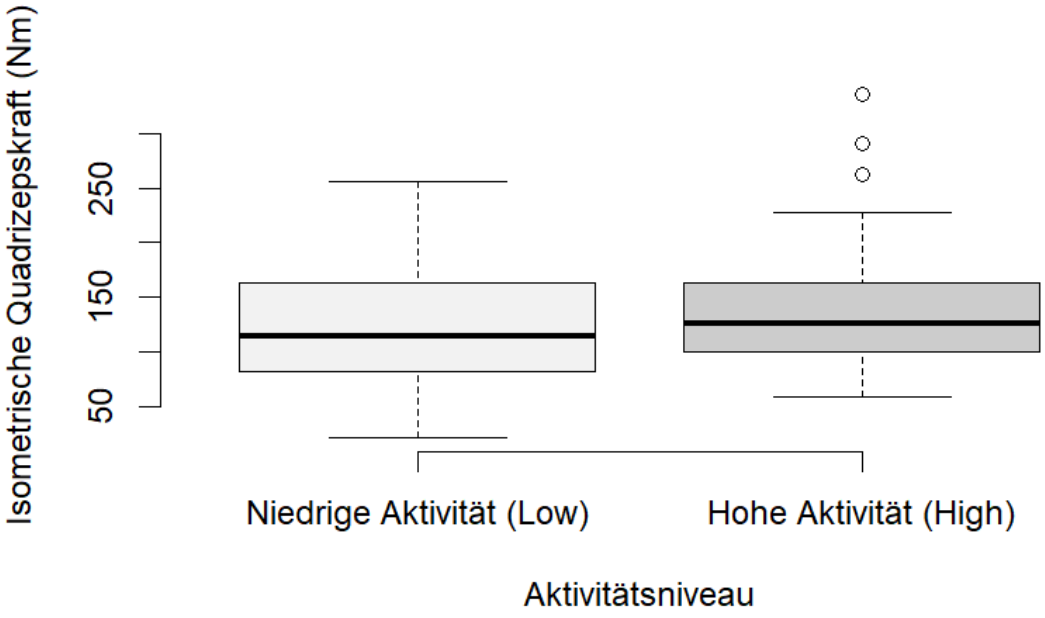


Abbildung 2: Modell mit dem Vergleich der isometrischen Quadrizepskraft zwischen Patienten mit niedriger und hoher täglicher Schrittzahl.

Anhand der Tabelle 2 kann man sehen, dass Patienten mit hoher Gehaktivität einen höheren Median (125.5 Nm) der Quadrizepskraft aufweisen als die Gruppe mit niedriger Gehaktivtät (113.9 Nm). Dieses deskriptive Verteilungsmuster wird in Abbildung 2 visuell dargestellt. Nach Adjustierung für die vordefinierten zeigte sich im linearen Regressionsmodell jedoch eine leichte Umkehr dieses Effekts. Die aktive Gruppe wies adjustiert eine geringfügig niedrigere Muskelkraft auf ($\beta = -4.92$). Dieser Unterschied war statistisch nicht signifikant. Mit einem p-Wert von 0.714 und einem 95%-Konfidenzintervall von [–31.5; 21.7] überschreitet das Ergebnis die übliche Signifikanzgrenze deutlich. Ein isolierter Haupteffekt der körperlichen Aktivität auf die Quadrizepskraft konnte damit nicht nachgewiesen werden.

Tabelle 4: Ergebnisse der multivariablen linearen Regressionsanalysen für die separaten Effekte von Luftverschmutzung (Black Carbon) auf die Quadrizepskraft.

Expositionsvariable	Gruppe	Absolute Quadrizeps-kraft (Nm) [IQR]	Koeffizient (β)	95% - KI	p-Wert
Luftverschmutzung (Black Carbon)	**Low**	107.7 [76.9]	Referenz	Referenz	Referenz
	High	126.3 [58.4]	6.57	[-17.4, 30.6]	0.586

Anmerkungen: Nm = Newtonmeter; β = unstandardisierter Regressionskoeffizient; 95%-KI = 95%-Konfidenzintervall; p = p-Wert; IQR = Interquartilsabstand. Das Modell wurde adjustiert für: Alter, Geschlecht, Raucherhistorie (Pack-years) und FEV1 (% predicted).

Analog zur körperlichen Aktivität wurde der isolierte Effekt der Luftverschmutzung analysiert. Auch hier zeigte sich in adjustierten Rohdaten zunächst ein deskriptiver Unterschied zugunsten der stärker belasteten Gruppe. Patienten mit einer geringen chronischen Black-Carbon-Exposition (107.7 Nm) wiesen eine absolut tiefere Muskelkraft auf als die höher exponierte Gruppe (126.3 Nm). In der Abbildung 3 ist diese Verteilung visuell dargestellt. Nach Adjustierung im multivariablen Modell ergab sich ein positiver Koeffizient von β = 6.57 (Tabelle 3). Dieser Befund ist jedoch statistisch nicht interpretierbar. Das 95%-Konfidenzintervall schloss die Null ein [–17.4; 30.6], und der p-Wert von 0.586 verfehlte das Signifikanzniveau deutlich. Somit liess sich auch für die chronische Schadstoffbelastung am Wohnort kein signifikanter Einfluss auf die periphere Muskelkraft der untersuchten Kohorte nachweisen.

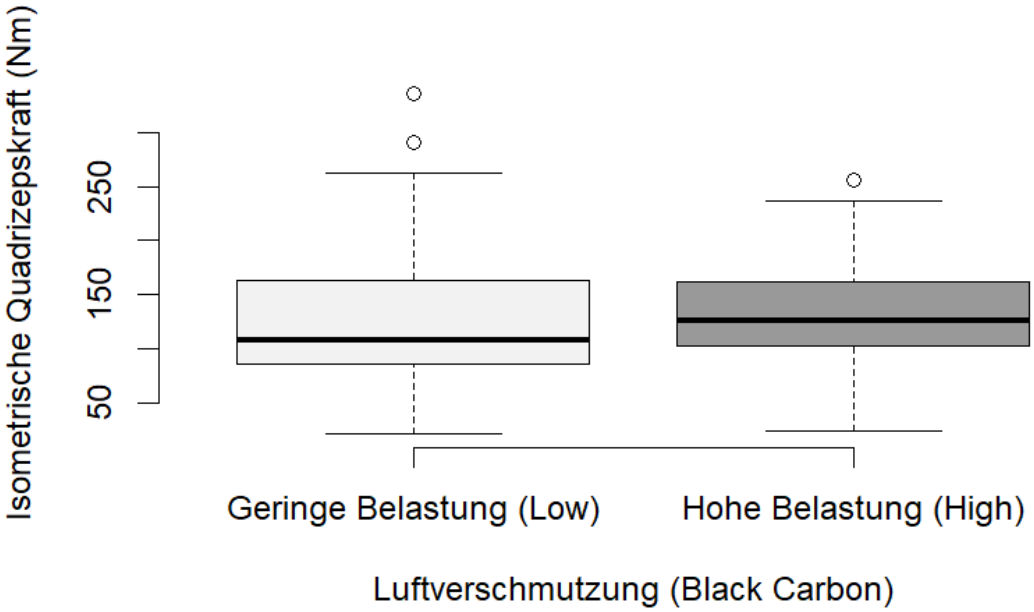


Abbildung 3: Modell mit dem Vergleich der isometrischen Quadrizepskraft bei geringer und erhöhter Luftverschmutzung durch Black Carbon

3.2 Kombinierte Effekte von körperlicher Aktivität und Luftverschmutzung

Zur Untersuchung kombinierter Effekte wurden die Probandinnen und Probanden anhand einer 2×2-Matrix aus Aktivitätsniveau und Schadstoffbelastung stratifiziert. Tabelle 4 und Abbildung 4 fassen die Ergebnisse zusammen. Im deskriptiven Vergleich der Rohdaten zeigte die Subgruppe mit hoher Aktivität und hoher Luftverschmutzung («High-High») den höchsten absoluten Kraftmedian (127.3 Nm), während die «Low-Low»-Referenzgruppe mit 97.3 Nm den niedrigsten Wert aufwies (Abbildung 4). Nach Adjustierung für die Kovariaten blieben die Regressionskoeffizienten aller Subgruppen positiv. Exemplarisch sei die Gruppe «Low-High» genannt, für die sich ein Koeffizient von $\beta = 18.63$ ergab. Dennoch verfehlten sämtliche Gruppenvergleiche das Signifikanzniveau (alle $p > 0.28$). Auch die kombinierte Betrachtung von Alltagsmobilität und chronischer Luftschadstoffexposition lieferte damit keinen statistisch belastbaren Hinweis auf einen Zusammenhang mit der isometrischen Quadrizepskraft.

Tabelle 5: Ergebnisse des multivariablen linearen Regressionsmodells für die kombinierten Effekte der 2x2-Expositionsmatrix

Expositionsgruppe (Aktivität - Luft)	Absolute Quadrizepskraft (Nm) [IQR]	Koeffizient (β)	95% - KI	p-Wert
Low - Low	97.3 [42.8]	Referenz	Referenz	Referenz
High - Low	119.9 [72.4]	11.02	[-30.2, 52.2]	0.596
Low - High	125.2 [78.0]	18.63	[-15.9, 53.2]	0.286
High - High	127.3 [39.5]	4.06	[-32.3, 40.4]	0.825

Anmerkungen: Nm = Newtonmeter; β = unstandardisierter Regressionskoeffizient; 95%-KI = 95%-Konfidenzintervall; p = p-Wert; IQR = Interquartilsabstand. Als gemeinsame Referenzgruppe dient die Zeile «Low-Low» (niedrige Aktivität und geringe Luftverschmutzung). Das Modell wurde adjustiert für: Alter, Geschlecht, Raucherhistorie (Pack-years) und FEV1 (% predicted).

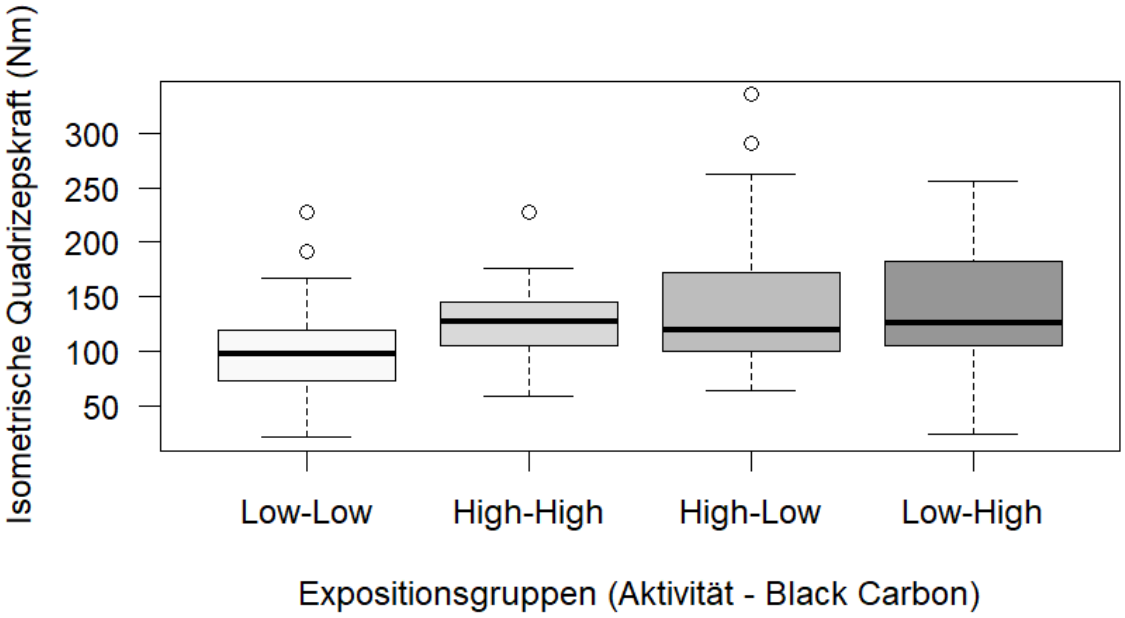


Abbildung 4: Modell mit den kombinierten Effekten von körperlicher Aktivität und Luftverschmutzung auf die isometrische Quadrizepskraft.

4 Diskussion

4.1 Zusammenfassung der Hauptergebnisse

Das primäre Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, den isolierten sowie den kombinierten Einfluss von Alltagsmobilität (Schrittzahl) und verkehrsbedingter Luftverschmutzung (Black Carbon) auf die isometrische Quadrizepskraft bei Patientinnen und Patienten mit COPD zu untersuchen. Die Ergebnisse entsprachen nicht den formulierten Hypothesen. Nach Adjustierung für die relevanten klinischen und demografischen Störgrössen Alter, Geschlecht, FEV1 und Pack-years zeigte sich weder für das körperliche Aktivitätsniveau noch für die häusliche Schadstoffbelastung am Wohnort ein statistisch signifikanter Haupteffekt auf die maximale isometrische Quadrizepskraft.

Auch in der kombinierten Betrachtung der Expositionsmatrix konnten keine statistisch belastbaren additiven oder synergistischen Effekte nachgewiesen werden. Die deskriptiven Rohdaten wiesen zwar sichtbare Kraftunterschiede auf, darunter einen tendenziellen Kraftvorteil hochaktiver sowie höher exponierter Probandinnen und Probanden. Dieser Befund verlor jedoch im multivariablen Regressionsmodell seine statistische Relevanz, da er weitestgehend durch den erheblichen Einfluss der Kovariaten erklärt werden konnte.

4.2 Interpretation der separaten und kombinierten Effekte

4.2.1 Körperliche Aktivität und isometrische Quadrizepskraft

Auf den ersten Blick erscheinen diese Ergebnisse kontraintuitiv, da körperliche Bewegung als fester Bestandteil der therapeutischen Versorgung bei COPD gilt. Im adjustierten Modell zeigte

eine höhere tägliche Schrittzahl keine signifikante Assoziation mit einer besseren isometrischen Quadrizepskraft (β=−4.92; p=0.714). Diese Befunde lassen sich jedoch durch zwei wesentliche physiologische und methodische Faktoren erklären.

Erstens belegen die Ergebnisse dieser Arbeit das Vorliegen eines ausgeprägten Confounding-Effekts durch biologische Determinanten. Der in den unadjustierten Daten beobachtete Kraftvorteil der aktiven Gruppe (125.5 Nm gegenüber 113.9 Nm) war nicht kausal auf das Gehen im Alltag zurückzuführen. In der pneumologischen und gerontologischen Forschung ist gut etabliert, dass demografische und anthropometrische Faktoren wie ein geringeres Lebensalter oder das männliche Geschlecht einen gleichzeitigen Einfluss auf mehrere Variablen ausüben. Sie begünstigen sowohl ein aktiveres Alltagsverhalten (Delgado-Ortiz et al., 2025; Watz et al., 2014) als auch eine biologisch bedingt höhere absolute Skelettmuskelmasse und neuromuskuläre Maximalkraft (Maltais et al., 2014; Swallow et al., 2007). Sobald diese anthropometrischen Parameter im multivariablen Regressionsmodell kontrolliert und somit künstlich konstant gehalten wurden, verpuffte der separate Effekt der körperlichen Aktivität vollständig.

Zweitens ist das trainingswissenschaftliche Prinzip der Spezifität zu berücksichtigen. Die Gehaktivität in Form von Schritten stellt primär eine submaximale Ausdauerbelastung mit geringem mechanischem Widerstand dar (Pitta et al., 2005; Watz et al., 2014). Diese Form der Aktivität bewirkt vorwiegend kardiovaskuläre Anpassungen sowie eine verbesserte aerobe Kapazität und Ermüdungsresistenz der Typ-I-Muskelfasern (Watz et al., 2014). Die in dieser Arbeit untersuchte Zielgrösse (QMVC= maximale willkürliche Kontraktion des Quadrizeps) spiegelt jedoch die neuromuskuläre Maximalkapazität wider. Diese wird massgeblich durch die Rekrutierung und den Querschnitt der Typ-II-Muskelfasern bestimmt. Patientinnen und Patienten mit COPD weisen da häufig einen pathologischen Abbau auf (Maltais et al., 2014). Alltägliche körperliche Aktivität in Form von Schritten erzeugen nachweislich keinen ausreichend hohen mechanischen Reiz im Sinne der progressiven Überlastung, um in der Oberschenkelmuskulatur signifikante Kraftsteigerungen auszulösen. Hierfür wäre ein gezieltes Krafttraining erforderlich (Maltais et al., 2014).

4.2.2 Luftverschmutzung und isometrische Quadrizepskraft

Der isolierte Effekt der Luftverschmutzung auf die periphere Muskelkraft erwies sich im adjustierten Regressionsmodell als statistisch nicht signifikant. Der ermittelte Regressionskoeffizient war positiv (β=6.57; p=0.586). Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zur am Anfang aufgestellten Hypothese, dass eine chronische Schadstoffexposition den muskulären Abbau über systemische Entzündungswege forciert. Für das Fehlen eines signifikanten negativen Effekts könnten methodische Aspekte der Expositionsschätzung verantwortlich sein. Die individuelle Black-Carbon-Belastung wurde retrospektiv über einen Zeitraum von zwei Jahren anhand von Landnutzungsregressionsmodellen geschätzt, die auf der jeweiligen Wohnadresse der Studienteilnehmenden basierten. Dieses Verfahren bildet die chronische Hintergrundbelastung am Wohnort präzise ab. Patientinnen und Patienten mit COPD weisen im Alltag sehr heterogene Mobilitätsmuster und Aktivitätsmuster auf. Diese hängen stark von der individuellen

Krankheitsschwere und Symptomlast ab (Pitta et al., 2005; Watz et al., 2014). Infolgedessen kann die reale Inhalationsdosis erheblich von der reinen Hintergrundbelastung am Wohnort abweichen.

Darüber hinaus wies die exponiertere Gruppe in den deskriptiven Rohdaten einen überraschend hohen absoluten Kraftmedian auf (126.3 Nm gegenüber 107.7 Nm). Dies könnte auf einen soziodemografischen Selektionseffekt innerhalb der Barceloner Kohorte hindeuten. Patientinnen und Patienten, die in dichtem besiedeltem Gebieten mit höherer Black-Carbon-Konzentration leben, partizipieren möglicherweise auf andere Weise am urbanen Alltag. Darüber hinaus könnten sie andere, bislang unberücksichtigte Lebensstilfaktoren aufweisen als Personen in schadstoffärmeren Randgebieten. Erschwerend kommt die hohe Varianz innerhalb der Gruppen hinzu, die einen IQR von bis zu 76.9 Nm erreicht. Bei einer Stichprobengrösse von n=104 erschwert diese Streuung die statistische Isolierung schadstoffinduzierter Kraftverluste erheblich, die über systemischen oxidativen Stress und chronische Inflammation vermittelt werden (MacNee, 2005; Wouters et al., 2002).

4.2.3 Kombinierte Effekte

In der stratifizierten 2x2-Matrix verfehlten sämtliche Subgruppenvergleiche gegenüber der Referenzgruppe «Low-Low» das Signifikanzniveau deutlich (alle $p > 0.28$). Das pathophysiologische Paradoxon, wonach eine hohe Schadstoffbelastung die protektiven Effekte körperlicher Aktivität aufhebt, liess sich auf Ebene der peripheren Maximalkraft somit nicht bestätigen *(De-Florio-Barker et al., 2020; Sinharay et al., 2018)*. Dieses Ausbleiben einer Interaktion ist eine logische Konsequenz aus den isolierten Analysen. Bereits die Schrittzahl allein übte keinen relevanten mechanischen Trainingsreiz auf die isometrische Maximalkraft aus (Maltais et al., 2014). Es existierte damit kein messbarer Kraftgewinn, den eine erhöhte Black-Carbon-Exposition hätte abschwächen oder beeinflussen können. Luftschadstoffe greifen im realen Alltag vorrangig in akute pulmonale und kardiovaskuläre Mechanismen ein, etwa in die bronchiale Weitstellung oder die endotheliale Funktion *(Sinharay et al., 2018)*. Die chronische Schädigung der Skelettmuskulatur durch verkehrsbedingte systemische Inflammation ist ein gradueller Prozess *(Barnes & Celli, 2009; Wouters et al., 2002)*. Dieser erfordert vermutlich deutlich höhere Schadstoffkonzentrationen als in der vorliegenden Stichprobe vorhanden oder äussert sich eher in einer eingeschränkten muskulären Ausdauerleistungsfähigkeit als im absoluten statischen Drehmoment.

4.3 Bezug zum aktuellen Forschungsstand

Die Ergebnisse dieser Arbeit leisten einen Beitrag zum Verständnis der extrapulmonalen Manifestationen der COPD im realen Lebensumfeld der Betroffenen. Periphere Muskelschwäche gilt in der Fachliteratur als anerkannte Systemfolge der Erkrankung. Studien wie jene von Swallow et al., (2007) haben wiederholt belegt, dass die Quadrizepskraft einen unabhängigen Prädiktor für die Mortalität bei COPD darstellt. Der therapeutische Nutzen strukturierter Trainingstherapie auf die Muskelkraft ist dabei gut dokumentiert. Die vorliegenden Ergebnisse zur habituellen Alltagsaktivität zeichnen jedoch ein differenzierteres Bild.

Da die vorliegende Arbeit auf einer Subkohorte des europäischen Mobilise-D-Projekts basiert, lassen sich die Ergebnisse unmittelbar in die Publikation von Delgado-Ortiz et al., (2025) einordnen. (Delgado-Ortiz et al., 2025) konnten in der europäischen Gesamtkohorte zeigen, dass digitale Gangparameter wie beispielsweise die reale Gehgeschwindigkeit eng mit dem klinischen Schweregrad der COPD korrelieren und sich signifikant von gesunden Gleichaltrigen unterscheiden. Die vorliegende Teiluntersuchung am Standort Barcelona richtete ihren Fokus hingegen auf die isometrische Maximalkraft der Oberschenkelmuskulatur. Dieser Kontrast untermauert eine wesentliche wissenschaftliche Erkenntnis. Die sensorbasierte Alltagsmobilität (Schrittleistung) ist zwar ein hervorragender Spiegel der respiratorischen Symptomlast und des allgemeinen funktionellen Status im täglichen Leben, lässt jedoch keine direkten Rückschlüsse auf die isolierte Maximalkraft einzelner Muskelgruppen zu.

Hinsichtlich der Umweltkomponente unterscheidet sich die vorliegende Querschnittsanalyse deutlich von viel zitierten experimentellen Arbeiten wie jener von Sinharay et al., (2018). Diese konnten im Rahmen einer kontrollierten Crossover-Studie zeigen, dass ein zweistündiger Spaziergang an einer stark mit Dieselabgasen belasteten Strasse die positiven kardiorespiratorischen Effekte körperlicher Bewegung bei älteren Erwachsenen und Patientinnen und Patienten mit COPD akut blockiert. Die vorliegende Arbeit betrachtete hingegen die chronische Akkumulation solcher Effekte über zwei Jahre. Dass sich die dort beobachteten akuten Schädigungen nicht in dauerhaften Krafteinbussen der Kohorte aus Barcelona widerspiegelten, ist erklärungsbedürftig. Einerseits könnte der menschliche Organismus bei anhaltender Exposition gegenüber niedrigen Schadstoffkonzentrationen kompensatorische Mechanismen aktivieren. Andererseits maskieren möglicherweise klassische klinische Treiber wie fortschreitende Atemwegsobstruktion und altersbedingte Muskelveränderungen den potenziellen Umwelteinfluss auf die Skelettmuskulatur biologisch vollständig.

4.4 Stärken und Limitationen

Wie jede empirische Untersuchung weist auch die vorliegende Arbeit spezifische Stärken und Limitationen auf, die bei der Einordnung der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen.

4.4.1 Stärken der *Untersuchung*

Ein zentraler Vorteil dieser Untersuchung liegt in der vollständig objektiven Erfassung aller analysierten Variablen. Auf fehleranfällige Selbstauskünfte wie Fragebögen wurde bewusst verzichtet. Die Alltagsmobilität wurde stattdessen mithilfe validierter, tragbarer Beschleunigungssensoren unter realen Bedingungen präzise erfasst. Das angewandte Landnutzungsregressionsmodell (LUR) ermöglichte parallel dazu eine adressbezogene und chronische Schätzung der individuellen Black-Carbon-Belastung mit hoher räumlicher Auflösung.

Eine weitere Stärke stellt die hochstandardisierte Messung der primären Zielgrösse dar. Die isometrische Quadrizepskraft (QMVC) wurde an einem speziell konzipierten Messstuhl erhoben, der valide Kraftwerte des Oberschenkels lieferte. Zudem stärkt die konsequente statistische Kontrolle für klinische Störgrössen im Rahmen der multivariablen Regressionsmodelle die interne Validität der Berechnungen massgeblich.

4.4.2 Limitationen der Untersuchung

Gleichzeitig unterliegt die vorliegende Arbeit einigen Einschränkungen. Das zugrundeliegende Querschnittsdesign schliesst kausale Schlussfolgerungen grundsätzlich aus. Die erstellten Modelle können lediglich statistische Assoziationen aufzeigen, erlauben jedoch keine direkten Ableitungen über zeitliche Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge.

Des Weiteren kommt hinzu, dass sich die Stichprobengrösse auf 104 Patientinnen und Patienten eine einzigen urbanen Rekrutierungsstandort beschränkt. Insbesondere bei der Stratifizierung der Kohorte in die vier Quadranten der 2x2-Expositionsmatrix resultierten daraus kleine Subgruppen. Diese reduzierte statistische Menge in Kombination mit der hohen Varianz der gemessenen Kraftwerte könnte dazu geführt haben, dass potenziell vorhandene, aber sehr kleine Effekte der Luftverschmutzung übersehen wurden.

Abschliessend lässt sich sagen, dass die Expositionsabschätzung durch Landnutzungsregressionsmodelle gewissen Unschärfen unterliegen könnte. Obwohl die chronische Schadstoffkonzentration am Wohnort gut abgebildet wurde, kann es die individuelle Mikroumgebung nicht präzise erfassen. Die tatsächliche persönliche Inhalationsdosis wird massgeblich dadurch bestimmt, wie viel Zeit die Patienten in geschlossenen Innenräumen verbringen und in welchen spezifischen Vierteln sie ihre täglichen Schritte absolvieren. Diese Diskrepanz zwischen der berechneten Hintergrundbelastung und der realen Atemzug-Exposition limitiert die Genauigkeit der umweltepidemiologischen Aussagekraft.

4.5 Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass nach der statistischen Kontrolle relevanter demografischer und klinischer Störgrössen weder das alltägliche Aktivitätsniveau in Form der Schrittzahl noch die wohnortbezogene Belastung durch Black Carbon einen statistisch signifikanten isolierten Einfluss auf die isometrische Quadrizepskraft aufwiesen. Auch für die kombinierte Betrachtung der Expositionsmatrix liessen sich keine statistisch belastbaren zusammenwirkenden Effekte nachweisen.

Aus pneumologischer und trainingswissenschaftlicher Sicht zeigen diese Ergebnisse, dass das reine Sammeln von Alltagsschritten primär als submaximale Ausdauerbelastung wirkt. Um die neuromuskuläre Maximalkraft der Oberschenkelmuskulatur effektiv zu steigern, ist der mechanische Widerstand nicht ausreichend hoch. Für die klinische Praxis ergibt sich daraus eine wichtige Implikation. Ein aktiver Lebensstil im Alltag bleibt für die allgemeine Gesundheit und die Reduktion von Hospitalisierungen unverzichtbar. Zur gezielten Bekämpfung der peripheren Muskelschwäche muss jedoch zusätzlich ein spezifisches Krafttraining in die Therapie integriert werden.

Bei Betrachtung der Umweltkomponente zeigt die Arbeit, dass eine rein adressbezogene Hintergundschätzung der Schadstoffbelastung Limitationen aufweist, da sie die tatsächliche Inhalationsmenge während aktiver Phasen ausserhalb des Wohnorts nur unvollständig abbilden kann. Für zukünftige wissenschaftliche Studien in gross angelegten Projekten wie Mobilise-D empfiehlt sich der verstärkte Einsatz mobiler Echtzeitmessungen zur Erfassung individueller

Umweltexpositionen. Diese ermöglichen eine deutlich präzisere Abbildung realer Belastungssituationen. Des Weiteren könnten Folgestudien gezielt untersuchen, ob chronische Umweltbelastungen möglicherweise andere, subtilere Aspekte der Muskelfunktion beeinflussen, die über die hier erhobene isometrische Maximalkraft hinausgehen. Hierbei gilt es, den Fokus auf Aspekte wie die muskuläre Ermüdbarkeit oder die aerobe Kapazität der Muskelfasern zu richten. Ihre systematische Erfassung wäre daher ein wertvoller Beitrag zur Vervollständigung des wissenschaftlichen Bildes.

5 Literaturverzeichnis

Agustí, A., Celli, B. R., Criner, G. J., Halpin, D., Anzueto, A., Barnes, P., Bourbeau, J., Han, M. K., Martinez, F. J., Montes de Oca, M., Mortimer, K., Papi, A., Pavord, I., Roche, N., Salvi, S., Sin, D. D., Singh, D., Stockley, R., López Varela, M. V., … Vogelmeier, C. F. (2023). Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease 2023 Report: GOLD Executive Summary. *The European Respiratory Journal*, *61*(4), 2300239. https://doi.org/10.1183/13993003.00239-2023

Barnes, P. J., & Celli, B. R. (2009). Systemic manifestations and comorbidities of COPD. *The European Respiratory Journal*, *33*(5), 1165–1185. https://doi.org/10.1183/09031936.00128008

DeFlorio-Barker, S., Lobdell, D. T., Stone, S. L., Boehmer, T., & Rappazzo, K. M. (2020). Acute effects of short-term exposure to air pollution while being physically active, the potential for modification: A review of the literature. *Preventive Medicine*, *139*, 106195. https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2020.106195

Delgado-Ortiz, L., Buekers, J., Chynkiamis, N., Demeyer, H., Frei, A., Gimeno-Santos, E., Hansen, C., Hausdorff, J. M., Hopkinson, N. S., Jansen, C.-P., Kirsten, A., Koch, S., Maetzler, W., Megaritis, D., Puhan, M. A., Singleton, D., Vogiatzis, I., Watz, H., Del Din, S., … Garcia-Aymerich, J. (2025). How do people with COPD walk? A European study on digitally measured real-world gait. *The European Respiratory Journal*, *66*(1), 2402303. https://doi.org/10.1183/13993003.02303-2024

Fischer, P., Brunekreef, B., Bree, L. van, Hoek, G., Keuken, M. P., Brink, H. M. ten, Janssen, N. a. H., Simic-Lawson, M., Atkinson, R. W., Anderson, H. R., & Cassee, F. R. (2011). *Black Carbon as an Additional Indicator of the Adverse Health Effects of Airborne Particles Compared to PM10 and PM2.5*. https://repository.tno.nl/SingleDoc?docId=37415

Garcia-Aymerich, J., Lange, P., Benet, M., Schnohr, P., & Antó, J. M. (2006). Regular physical activity reduces hospital admission and mortality in chronic obstructive pulmonary disease: A population based cohort study. *Thorax*, *61*(9), 772–778. https://doi.org/10.1136/thx.2006.060145

Gollnick, P. D., Armstrong, R. B., Saubert, C. W., Piehl, K., & Saltin, B. (1972). Enzyme activity and fiber composition in skeletal muscle of untrained and trained men. *Journal of Applied Physiology*, *33*(3), 312–319. https://doi.org/10.1152/jappl.1972.33.3.312

MacNee, W. (2005). Pathogenesis of Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *Proceedings of the American Thoracic Society*, *2*(4), 258–266. https://doi.org/10.1513/pats.200504-045SR

Maltais, F., Decramer, M., Casaburi, R., Barreiro, E., Burelle, Y., Debigaré, R., Dekhuijzen, P. R., Franssen, F., Gayan-Ramirez, G., Gea, J., Gosker, H. R., Gosselink, R., Hayot, M., Hussain, S. N., Janssens, W., Polkey, M. I., Roca, J., Saey, D., Schols, A. M., … Wagner, P. D. (2014). An Official American Thoracic Society/European Respiratory Society Statement: Update on Limb Muscle Dysfunction in Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *American Journal of*

Respiratory and Critical Care Medicine, *189*(9), e15–e62. https://doi.org/10.1164/rccm.201402-0373st

Pitta, F., Troosters, T., Spruit, M., Probst, V., Decramer, M., & Gosselink, R. (2005). Characteristics of Physical Activities in Daily Life in Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *American journal of respiratory and critical care medicine*, *171*, 972–977. https://doi.org/10.1164/rccm.200407-855OC

Sinharay, R., Gong, J., Barratt, B., Ohman-Strickland, P., Ernst, S., Kelly, F. J., Zhang, J. J., Collins, P., Cullinan, P., & Chung, K. F. (2018). Respiratory and cardiovascular responses to walking down a traffic-polluted road compared with walking in a traffic-free area in participants aged 60 years and older with chronic lung or heart disease and age-matched healthy controls: A randomised, crossover study. *Lancet*, *391*(10118), 339–349. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32643-0

Swallow, E. B., Reyes, D., Hopkinson, N. S., Man, W. D., Porcher, R., Cetti, E. J., Moore, A. J., Moxham, J., & Polkey, M. I. (2007). Quadriceps strength predicts mortality in patients with moderate to severe chronic obstructive pulmonary disease. *Thorax*, *62*(2), 115–120. https://doi.org/10.1136/thx.2006.062026

Waschki, B., Kirsten, A., Holz, O., Müller, K.-C., Meyer, T., Watz, H., & Magnussen, H. (2011). Physical Activity Is the Strongest Predictor of All-Cause Mortality in Patients With COPD: A Prospective Cohort Study. *Chest*, *140*(2), 331–342. https://doi.org/10.1378/chest.10-2521

Watz, H., Pitta, F., Rochester, C. L., Garcia-Aymerich, J., ZuWallack, R., Troosters, T., Vaes, A. W., Puhan, M. A., Jehn, M., Polkey, M. I., Vogiatzis, I., Clini, E. M., Toth, M., Gimeno-Santos, E., Waschki, B., Esteban, C., Hayot, M., Casaburi, R., Porszasz, J., … Spruit, M. A. (2014). An official European Respiratory Society statement on physical activity in COPD. *The European Respiratory Journal*, *44*(6), 1521–1537. https://doi.org/10.1183/09031936.00046814

Wouters, E. F. M., Creutzberg, E. C., & Schols, A. M. W. J. (2002). Systemic Effects in COPD. *CHEST*, *121*(5), 127S-130S. https://doi.org/10.1378/chest.121.5_suppl.127S

Selbstständigkeitserklärung / Autorenrechte

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäss aus Quellen entnommen wurden, habe ich als solche gekennzeichnet. Darüber hinaus bestätige ich, dass die vorgelegte Arbeit nicht an einer anderen Hochschule als Seminar-, Projekt- oder Abschlussarbeit oder als Teil solcher Arbeiten eingereicht wurde.

Des Weiteren versichere ich, sämtliche Textpassagen, die unter Zuhilfenahme KI-gestützter Programme verfasst wurden, entsprechend gekennzeichnet sowie mit einem Hinweis auf das verwendete KI-gestützte Programm versehen zu haben.

Eine Überprüfung der Arbeit auf Plagiate und KI-gestützte Programme – unter Einsatz entsprechender Software – darf vorgenommen werden. Bei begründetem Verdacht auf eine unerlaubte oder nicht gekennzeichnete Anwendung von KI bei schriftlichen Leistungsüberprüfungen ist die Kandidatin bzw. der Kandidat auf Einladung hin verpflichtet, an der Klärung des Verdachts mitzuwirken, z.B. durch Teilnahme an einem Gespräch. Ich habe zur Kenntnis genommen, dass unlauteres Verhalten zu einer Bewertung der betroffenen Arbeit mit einer Note 1 oder mit «nicht bestanden» bzw. «fail» oder zum Ausschluss vom Studium führen kann (gemäss §25 der Ordnung für das Bachelorstudium «Sport, Bewegung und Gesundheit» an der Medizinischen Fakultät der Universität Basel vom 19. November 2018).

Hiermit bestätige ich, dass die Publikation der vorliegenden Arbeit oder Teile des Inhalts – auch in Auszügen beziehungsweise als Zusammenfassungen oder in Rohdatenform – sowie die Abgabe der Autorenrechte (auch unentgeltlich) an Verlage oder Dritte stets der Einwilligung des Gutachters bedarf.

Datum: 12.06.2026 Unterschrift: 