Validierung eines Rechenalgorithmus zur individuellen Energieumsatzbestimmung von Frühgeborenen im Inkubator

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades einer
Doktorin der Medizin (Dr. med.)

an der

Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg

vorgelegt von

Annika Julia Maria
Lommetz

aus

Tuttlingen

2025

Betreuer/ Gutachter der Dissertation:	Prof. Dr. Dominique Singer
Gutachter der Dissertation:	PD Dr. Martin Petzoldt
Vorsitz der Prüfungskommission:	PD Dr. Martin Petzoldt
Mitglied der Prüfungskommission:	Prof. Dr. Irwin Reiss
Mitglied der Prüfungskommission:	Prof. Dr. Antonia Zapf
Datum der mündlichen Prüfung:	03.09.2026

Inhaltsverzeichnis

1 **Arbeitshypothese und Fragestellung** 5

2 **Einleitung** 6

2.1 Theoretische Grundlagen 6

3 **Material und Methoden** 17

3.1 Ein- und Ausschlusskriterien 17

3.2 Allgemeine Deskription des Studienkollektivs 18

3.3 Untersuchungszeitraum 19

3.4 Studienprotokoll 19

3.5 Statistische Auswertung 20

3.6 Funktionsweise des Wärmeflussdetektors 21

3.7 Durchführung der Wärmeflussmessung 22

3.8 Rechenalgorithmus zur Bestimmung des Energieumsatzes 26

4 **Ergebnisse** 30

4.1 Wärmeflussmessungen 30

4.2 Rechenalgorithmus 34

5 **Diskussion** 36

5.1 Methodenkritik 36

5.2 Postnataler Energieumsatzanstieg 40

5.3 Vergleich der Ergebnisse mit Daten aus der Literatur 48

5.4 Schlussfolgerung 53

6 **Zusammenfassung** 54

7 **Summary** 55

8 **Literaturverzeichnis** 56

9 **Abkürzungsverzeichnis** 60

10 **Abbildungsverzeichnis** 63

11 **Tabellenverzeichnis** 65

12 **Erklärung des Eigenanteils** 66

13 **Eidesstattliche Versicherung** 67

14 **Danksagung** 68

15 **Anhang** 69

15.1 Dokumentation – Stammdaten 69

15.2 Dokumentation – Wärmeflussmessung 70

15.3 Dokumentation - Rechenalgorithmus 71

15.4 Unbeeinflussbare Wasserverluste über die Haut und die Lunge (ILW) 72

15.5 Wärmeverluste 73

1 Arbeitshypothese und Fragestellung

Die ersten postnatalen Tage und Wochen eines Früh- bzw. Neugeborenen sind unter anderem (u.a.) von einem Anstieg des Energieumsatzes gekennzeichnet (Bauer et al., 2003a). Dieser Anstieg ist sowohl physiologischer Ausdruck eines postnatalen Adaptationsprozesses als auch einer zunehmenden postnatalen Energiezufuhr (Chessex et al., 1981). Im Umkehrschluss lässt sich anhand des Energieumsatzes auf die optimale Energiezufuhr und weitere wichtige Parameter (u.a. thermische Umgebung, O_2-Angebot, Feuchtigkeit) schließen, um ein adäquates Wachstum zu erreichen. Daher wäre die individuelle und kontinuierliche Kenntnis des neonatalen Energieumsatzes ein wichtiger Faktor, um das Outcome von Frühgeborenen zu verbessern (Krämer et al., 1999, Hulzebos and Sauer, 2007, Sauer et al., 1984a, Abranches et al., 2018).
Aktuell gehört die Ermittlung des individuellen Energieumsatzes allerdings nicht zum Standardmonitoring auf neonatologischen Intensivstationen. Ein Grund hierfür ist vor allem, dass das etablierte Messverfahren, die indirekte Kalorimetrie, einen hohen technischen und zeitlichen Aufwand verursacht.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Energieumsatz von Frühgeborenen durch ein nicht-invasives Verfahren zu bestimmen, sowie die anschließende Validierung der Ergebnisse, um ein mögliches individuelles Stoffwechselmonitoring zu etablieren, das kontinuierlich im klinischen Alltag einsetzbar ist.

Dazu wird anhand von biographischen und thermischen Daten der Energieumsatz von inkubatorversorgten Frühgeborenen berechnet. Parallel wird an einem Teil des Studienkollektivs der Wärmefluss als Parameter für den Energieumsatz gemessen. Abschließend werden die berechneten Ergebnisse stichprobenartig sowohl mit den Ergebnissen der Wärmeflussmessungen als auch mit verfügbaren Daten aus der Literatur verglichen.

In der vorliegenden Studie sollen folgende Fragestellungen geklärt werden:

- Kann ein Rechenalgorithmus als kontaktloses, nicht-invasives Verfahren den individuellen Energieumsatz von Frühgeborenen erfassen, die in einem Inkubator versorgt werden?
- Stimmen die errechneten Energieumsätze an verschiedenen Zeitpunkten mit den gemessenen Werten durch den Wärmefluss überein?
- Stimmen die Ergebnisse, die mittels Wärmeflussmessung und Rechenalgorithmus ermittelt wurden, mit den Daten aus der Literatur überein?

2 Einleitung

2.1 Theoretische Grundlagen

2.1.1 Energiehaushalt im Allgemeinen

Der menschliche Körper benötigt für alle lebensnotwendigen Prozesse (u.a. Strukturerhalt, Auf- und Abbau, Leistung von Arbeit) die Zufuhr von Energie. Diese Energie wird dem Körper durch die Aufnahme von Nährstoffen über die Nahrung zugeführt. Dabei kann der Körper vor allem aus drei unterschiedlichen Quellen Energie verwerten: Kohlenhydrate, Proteine und Fette (Grissmer, 2012).

Die pro Zeiteinheit umgesetzte Energiemenge zur Aufrechterhaltung aller Lebensvorgänge wird als Energieumsatz bezeichnet. Der Energieumsatz wird durch zahlreiche Faktoren wie zum Beispiel Alter, Geschlecht, Körpermaße, körperliche Aktivität oder Wachstum beeinflusst (Gekle, 2019) und kann in drei wesentliche Bestandteile aufgegliedert werden: Grundumsatz, Leistungs- oder Arbeitsumsatz sowie nahrungsinduzierte Thermogenese (Kreymann, 2018).

Dabei kann der Körper nur einen Bruchteil der zugeführten Energie verwerten. Ein Teil wird zur Strukturerhaltung verwendet. Darunter versteht man zum Beispiel die Aufrechterhaltung der Gewebestruktur oder Zellarchitektur. Diese Energie steht dem Körper lediglich für diesen Zweck zur Verfügung und wird als nicht verwertbare Energie bezeichnet.

Damit der Energieumsatz ausgeglichen ist und eine ausgewogene Energiebilanz besteht, muss die Energiezufuhr dem Energiebedarf entsprechen. Ist dies nicht der Fall kommt es entweder zu einer anabolen oder zu einer katabolen Stoffwechsellage. Während einer anabolen Stoffwechsellage wird die zugeführte Energie zum Aufbau körpereigener Strukturen verwendet. Diese Phase wird auch als Aufbaustoffwechsel bezeichnet und findet physiologisch während des Wachstums statt (Gekle, 2018).

Die katabole Stoffwechsellage hingegen beschreibt den Abbau von körpereigenen Strukturen zur Energiegewinnung (Lehninger et al., 2011).

2.1.2 Energieumsatzanstieg von Früh- und Neugeborenen

Der Zusammenhang zwischen Energieumsatz und Körpergröße geht auf Beobachtungen von Max Kleiber zurück. Er beschreibt mit seinem „Gesetz der Stoffwechselreduktion“ die Beziehung zwischen Energieumsatz und Körpergröße, die ihren Ausdruck in der sogenannten Kleiber-Formel wiederfindet (Patton, 1962, Singer, 2002).

$$BMR\ (W) = 3{,}4 \times BW\ (kg)^{0{,}75}$$

BMR = Basal Metabolic Rate, Grundumsatz

BW = Body Weight, Körpergewicht

Sie besagt, dass der Energieumsatz mit zunehmendem Körpergewicht relativ abnimmt. Verdeutlicht wird diese Gesetzmäßigkeit anhand der sogenannten „Maus-Elefant-Kurve“ vgl. Abbildung 1. In dieser wird zur besseren Darstellbarkeit statt des absoluten Grundumsatzes, der spezifische Grundumsatz in Bezug zum Körpergewicht aufgetragen. Dementsprechend ändert sich die Formel wie folgt:

$$BMR\ (W \times kg^{-1}) =\ 3{,}4 \times BW\ (kg)^{-0{,}25}$$

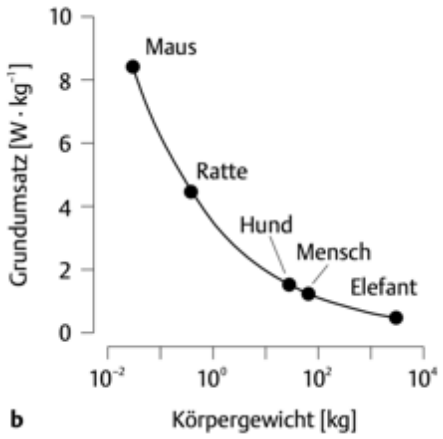


Abbildung 1: „Maus-Elefant-Kurve“ (Singer, 2002)

Während der Fetalperiode wird der Fetus kontinuierlich über die Plazenta mit Nährstoffen versorgt. Es herrscht eine anabole Stoffwechsellage. Die metabolische Allometrie ist außer Kraft gesetzt, da sich der Fetus metabolisch „wie ein Organ der Mutter“ verhält und der Energieumsatz von Mutter und Fetus nahezu identisch sind (vgl. Abbildung 2) (Singer, 2002).

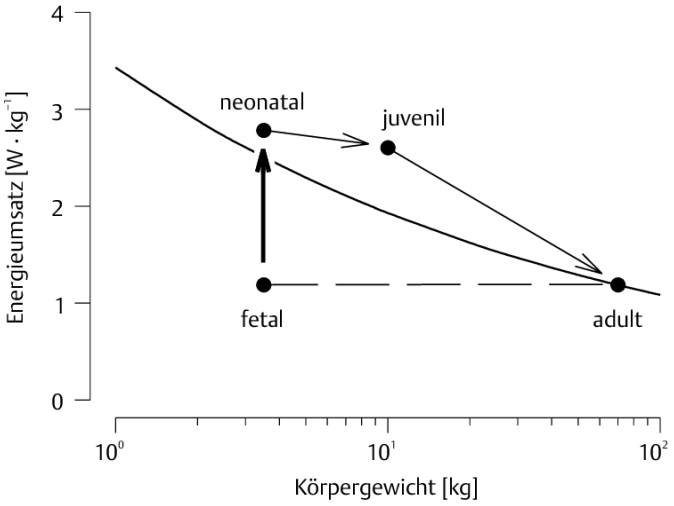


Abbildung 2: Ontogenese des Stoffwechsels (Singer, 2002)

Diese Gegebenheiten ändern sich zum Zeitpunkt der Geburt. Das Neugeborene wird abrupt von der kontinuierlichen Nährstoffversorgung über die Plazenta getrennt. Mit der Abnabelung beginnt eine Anpassung an das extrauterine Leben. Neben einer adäquaten Belüftung der Lunge und der Aktivierung der Thermoregulation muss der Energieumsatz entsprechend der postnatal Begebenheiten ansteigen (Platt and Deshpande, 2005, Morton and Brodsky, 2016). Unmittelbar nach der Geburt ist der Energieumsatz des Neugeborenen im Verhältnis zu seiner Körpergröße noch auf einem niedrigen Niveau und steigt in der Neonatalperiode an (Bruck et al., 1957, Hill and Rahimtulla, 1965).

Bei Frühgeborenen beansprucht dieser postnatale Energieumsatzanstieg einen längeren Zeitraum als bei Reifgeborenen. Außerdem fällt er größer aus und erreicht ein höheres Niveau (Bauer et al., 2009).

Nach wenigen Lebenswochen stabilisiert sich der postnatale Energieumsatzanstieg sowohl bei Neu- als auch Frühgeborenen auf einem im Verhältnis zur Körpergröße weiterhin erhöhten Niveau. Dies wird vor allem auf die hohe Wachstumsrate zu dieser Zeit zurückgeführt. Erst während des späten Kleinkind- und Schulkindalters fällt der Energieumsatz auf das entsprechend der Kleiber-Formel zu erwartende Energieumsatzniveau ab (Hering, 2009).

2.1.3 Einflussfaktoren des Energieumsatzes und sein Anstieg bei Frühgeborenen

Der Energieumsatz und sein postnataler Anstieg werden durch zahlreiche Faktoren beeinflusst (Hulzebos and Sauer, 2007). Diese lassen sich in endogene und exogene Faktoren unterteilen:

Endogene Faktoren

Die endogenen Faktoren umfassen, neben genetischen Einflüssen, das **Gestationsalter** bzw. aktuelle **Lebensalter** und das **Geburtsgewicht** bzw. aktuelle **Körpergewicht** (DeMarie et al., 1999, Bauer et al., 2009). In Bezug auf das Gestationsalter konnten Bauer et al. zeigen, dass der postnatale Energieumsatzanstieg umso höher ausfällt, je geringer das Gestationsalter ist.

Die **körpereigenen Hormone** wie zum Beispiel Adrenalin, Noradrenalin, Trijodthyronin und Cortisol nehmen ebenfalls Einfluss auf den Stoffwechsel. In Stresssituationen kommt es zu einer vermehrten Ausschüttung dieser Hormone, die für einen Anstieg des Energieumsatzes sorgen (Gekle, 2018, Hering, 2009).

Ferner konnte in einigen Studien gezeigt werden, dass es zu einem **postprandialen Anstieg** des Energieumsatzes kommt. Dies wird auf die Prozesse der Nahrungsverarbeitung zurückgeführt (Freymond et al., 1986).

Mit zunehmendem Alter steigt zudem der Energieumsatz durch die zunehmende **physische Aktivität** an (Freymond et al., 1986, Hay et al., 2014, Reichman et al., 1982).

Exogene Faktoren

Zu den exogenen Faktoren gehört insbesondere die **Energiezufuhr**. Ein adäquates Ernährungsregime ist vor allem für Frühgeborene die Voraussetzung für ein regelrechtes Wachstum. Zahlreiche Studien zu diesem Thema konnten zeigen, dass eine adäquate Energiezufuhr den Energieumsatz ansteigen lässt (Chessex et al., 1981, Bauer et al., 2003a, Bauer et al., 2003b, Hulzebos and Sauer, 2007). Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass formulaernährte Kinder im Vergleich zu muttermilchernährten Kindern einen höheren Energieumsatzanstieg haben (Lubetzky et al., 2003).

Eine **thermoneutrale Umgebung** sorgt dafür, dass der Energieumsatz konstant bleibt, während thermaler Stress zu einem Anstieg des Energieumsatzes führt (Sauer et al., 1984b).

Die **Beatmungsform** hat ebenfalls einen Einfluss auf den Energieumsatz. Bei Frühgeborenen, die keine Atemunterstützung benötigen konnte im Vergleich zu Frühgeborenen, die eine CPAP (continuous positive airway pressure) - Atemunterstützung haben, ein höherer Energieumsatz nachgewiesen werden. Ein Erklärungsansatz hierfür ist, dass die CPAP-Atemunterstützung eine mögliche respiratorische Entlastung darstellt (Bauer et al., 2001, Bauer et al., 2003b).

Die **Sepsis** ist ein häufiges Krankheitsbild in der Neonatologie. Sowohl die early- als auch late-onset Sepsis führen zu einem signifikanten Anstieg des Energieumsatzes (Bauer et al., 2002, Torine et al., 2007).

Neben dem Einfluss von Infektionen und im Körper ablaufenden Entzündungsreaktionen spielen darüber hinaus gerade im neonatologischen Bereich iatrogene Faktoren eine Rolle. So sorgt zum Beispiel die Verabreichung bestimmter **Medikamente** wie zum Beispiel Methylxanthine (Coffein), Katecholamine oder L-Thyroxin zu einer Steigerung des Energieumsatzes (Bauer et al., 2003a).

2.1.4 Verfahren zur Bestimmung des Energieumsatz

Für die Bestimmung des Energieumsatzes stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Der Energieumsatz kann sowohl mit speziellen Messgeräten/-apparaturen (direkte/indirekte Kalorimetrie, Wärmeflussmessung), sowie durch mathematische Formeln (Harris-Benedict-Formel, Vorhersageformeln der Weltgesundheitsorganisation, Rechen-algorithmen) bestimmt bzw. berechnet werden.
Gemäß dem internationalen System der Maßeinheiten (SI) lautet die Einheit (IE) für den Energieumsatz 1 Joule (J). Häufig wird allerdings auch noch die früher verwendete Einheit Kalorie bzw. Kilokalorie (cal bzw. kcal) verwendet (Biesalski and Adolph, 2010).

Kalorimetrie

Die Kalorimetrie ist ein Messverfahren zur Bestimmung der abgegebenen Wärmemenge wodurch auf den Energieumsatz geschlossen werden kann. Dabei werden zwei unterschiedliche Messvarianten, die direkte und indirekte Kalorimetrie, voneinander unterschieden.

Direkte Kalorimetrie

Die Messmethode der direkten Kalorimetrie basiert auf der Messung der Wärmeabgabe des Körpers. Gemäß dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik entspricht die abgegebene Wärme dem Energieumsatz. Die Messung findet in einer abgeschlossenen Messkammer, dem Kalorimeter, statt (Daniel and Wenzel, 2014, Müller et al., 2007).

Den Grundstein für diese Messmethode legten die Franzosen Antoine-Laurent de Lavoisier und Pierre-Simone Laplace im Jahre 1782/1783. Sie erfanden das Eiskalorimeter, mit dem es erstmalig möglich war die Wärmeabgabe zu messen. Dabei wurde im Rahmen von Tierexperimenten ein Meerschweinchen in das Zentrum einer isolierten und mit Eis befüllten Kammer gesetzt. Das Eis diente dazu die Wärmeabgabe des Meerschweinchens zu quantifizieren, da es durch die Wärmeabgabe des Tieres schmolz. Am Ende der Messung wurde das Schmelzwasser gewogen und das Ergebnis korrelierte direkt mit der Wärmeabgabe (Karamanou et al., 2013, Persson, 2007).

Die heutzutage verwendeten direkten Kalorimeter berechnen die Wärmeabgaben aus Temperaturunterschieden und Flussgeschwindigkeiten. Hierfür wird die Wärme über Luft- oder Wasserströme abgeführt (Müller et al., 2007).
Eine weitere Möglichkeit bietet das „Gradient-layer-Kalorimeter“. Hierbei wird die Wärmeabgabe ebenfalls anhand eines Temperaturgradienten bestimmt (Müller et al., 2007).

Im klinischen Alltag wird das Messverfahren der direkten Kalorimetrie auf Grund des hohen Zeitaufwandes nur noch selten angewandt. Zudem erschwert der zirkadiane Rhythmus der Körpertemperatur eine Messung da diese hierfür 24 Stunden durchgeführt werden müsste. Dies ist gerade in der Neonatologie nur erschwert umsetzbar, da die Versorgung (Pflegerunde inkl. Wickeln und Nahrungszufuhr (Sondierung), sowie ein Bonding mit den Eltern) mit einer regelmäßigen Unterbrechung der thermischen Gegebenheiten einhergeht. Darüber hinaus erhalten zahlreiche Frühgeborene eine Atemunterstützung, die den Einsatz spezieller Apparaturen notwendig macht, um die Messung überhaupt erst zu ermöglichen (Bauer et al., 2001). Daraus ergibt sich ein weiterer Nachteil, der mit einer kostenintensiven Geräteanschaffung einhergeht (Müller et al., 2007, Matarese, 1997).

Die direkte Kalorimetrie stellt allerdings bei optimalen Bedingungen eine präzise Messmethode zur Bestimmung des Energieumsatzes dar (Präzision ± 1-2%) (Müller et al., 2007).

Indirekte Kalorimetrie

Mit der indirekten Kalorimetrie wird der Energieumsatz indirekt über den Sauerstoffverbrauch (VO_2) und die Kohlendioxidproduktion (VCO_2) bestimmt (Haugen et al., 2007). Dieses Messprinzip geht ebenfalls auf eine Versuchsapparatur zurück, die von Lavoisier und Laplace entwickelt wurde.

Die heutigen Messapparaturen messen den Sauerstoffverbrauch und die Kohlendioxidproduktion dabei entweder über ein Mundstück, eine Gesichtsmaske, eine Atemhaube oder in einer Respirationskammer. Die häufigste verwendete Methode ist die Messung mittels Atemhaube (vgl. Abbildung 3) (Müller et al., 2007).

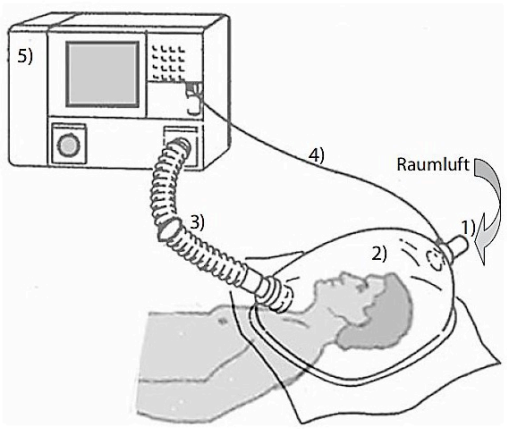


Abbildung 3: Indirekte Kalorimetrie (Müller et al., 2007)

1.Einlass von Raumluft

2.Atemhaube

3.Verbindungsschlauch

4.Inspiratorischer Probenschlauch

5.Gasanalysator und Flowgenerator

Die indirekte Kalorimetrie stellt aktuell den Goldstandard in der Energieumsatzmessung dar. Sie ermöglicht eine kontinuierliche Messung bei beatmeten und nicht beatmeten Probanden (Haugen et al., 2007).

Anhand der ermittelten Daten kann schließlich der Energieumsatz berechnet werden. Hierfür wird am häufigsten die gekürzte Formel nach Weir verwendet (Weir, 1949, Matarese, 1997).

$$REE = [3.9\,(VO2) + 1.1(VCO2)]1.44$$

REE = Ruheenergieumsatz in kcal/d

VO_2 = Sauerstoffverbrauch in (ml/min)

VCO_2 = Kohlendioxidabgabe in (ml/min)

In der gekürzten Formel wird die Stick- und Harnstoffausscheidung vernachlässigt, da gezeigt werden konnte, dass der Unterschied zwischen beiden Formeln weniger als 2% beträgt (Matarese, 1997).

Wärmeflussmessung

Entsprechend der Kalorimetrie beruht die Wärmeflussmessung ebenfalls auf einem Verfahren, bei dem die Wärmeabgabe zwischen dem Organismus/Menschen und seiner Umgebung erfasst wird (Tiemann, 2019).

Der Wärmefluss beschreibt eine physikalische Größe, die nicht direkt gemessen werden kann, sondern auf einer Temperaturdifferenz beruht.

Dabei fließt die Wärme immer vom Ort der höheren Temperatur zum Ort der niedrigeren Temperatur. Der Wärmefluss beschreibt dabei die Wärme, die pro Zeiteinheit fließt, und wird in Watt (W) gemessen (Heuberger and Fels, 2007).

Um auf sperrige/große Apparaturen zu verzichten wurden entsprechende Sensoren entwickelt, anhand derer man über die Differenz der Hauttemperatur zur unmittelbaren Umgebung den Wärmefluss messen kann. Mit Hilfe des gemessenen Wärmeflusses kann anschließend mit entsprechenden Formeln der Energieumsatz bestimmt werden (Koch, 2010).

Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Energieumsatzes

Die Bestimmung des Energieumsatzes mittels Kalorimetrie (direkt/indirekt) erfordert wie bereits erwähnt einen hohen apparativen und zeitlichen Aufwand. Aus diesem Grund wurden im letzten Jahrhundert zahlreiche Formeln zur Berechnung des Energieumsatzes entwickelt. Diese Formeln stellen jedoch lediglich eine Näherung dar, da zahlreiche Einflussfaktoren eine Rolle spielen. Hauptbestandteil der jeweiligen Formeln sind dabei folgende Variablen: Alter, Geschlecht sowie Körpergröße und -gewicht.

In dieser Arbeit wird lediglich eine Auswahl an Näherungsformeln exemplarisch erwähnt.

Harris-Benedict-Formel

Im Jahre 1918 veröffentlichten J. Arthur Harris und Francis G. Benedict eine Schätzformel zur Bestimmung des Ruheenergieumsatzes (Harris and Benedict, 1918). Als Grundlage für die Formel dienten unterschiedliche Studien zur indirekten Kalorimetrie.

Die Berechnung des Energieumsatz erfolgt anhand des Alters, des Geschlechtes, der Körpergröße und des Körpergewichtes.

Die Schätzformel nach Harris-Benedict lautet (Kreymann, 2003):

Frauen:

REE (kcal/d) = 655,096 + 1,850 x Größe (cm) + 9,563 x Gewicht (kg) – 4,676 x Alter (Jahre)

Männer:

REE (kcal/d) = 66,473 + 5,003 x Größe (cm) + 13,752 x Gewicht (kg) – 6,755 x Alter (Jahre)

Vorhersageformeln der Weltgesundheitsorganisation (WHO)

1985 brachte die WHO neuere Schätzformeln für den Grundumsatz (GU) heraus. Grundlage dieser Formeln waren zahlreiche Studien mit einer großen Anzahl an Einzelmessungen in mehreren Ländern. Die resultierenden Vorhersageformeln entstanden schließlich aus kompilierten Studien. Die Berechnung erfolgt ebenfalls anhand von Alter und Geschlecht (Müller et al., 2005, LIVESEY, 1987).

Tabelle 1: Schätzformel Grundumsatz nach FAO/WHO (Nations et al., 2004)

Alter (Jahre)	**GU** (weiblich)	**GU** (männlich)
Unter 3	= 0,244 x KG (kg) – 0,130MJ	= 0,249 x KG (kg) – 0,127MJ
3-10	= 0,085 x KG (kg) + 2,033MJ	= 0,095 x KG (kg) + 2,110MJ
10-18	= 0,056x KG (kg) + 2,898MJ	= 0,074 x KG (kg) + 2,754MJ
18-30	= 0,062 x KG (kg) + 2,036MJ	= 0,063 x KG (kg) + 2,896MJ
30-60	= 0,034 x KG (kg) + 3,538MJ	= 0,048 x KG (kg) + 3,653MJ
Über 60	= 0,038 x KG (kg) + 2,755MJ	= 0,049 x KG (kg) + 2,459MJ

Rechenalgorithmus

Zur Berechnung der Energiebilanz steht auch ein Rechenalgorithmus der Firma Drägerwerk AG & Co. KGaA zur Verfügung (Koch, 2017).
Grundlage der Berechnung sind dabei die unterschiedlichen Wärmeverluste (Konvektion, Radiation, Evaporation und respiratorische Wärmeverluste).

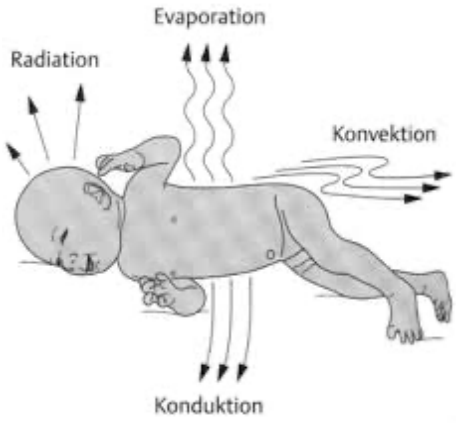


Abbildung 4: Mechanismen des Wärmeverlustes beim Früh- bzw. Neugeborenen (Kammerer, 2001)

Der in dieser Arbeit vorgestellte und verwendete Rechenalgorithmus wurde speziell für Früh-/Neugeborenen, die in einem Inkubator versorgt werden, angepasst.

Als Grundlage dient die Annahme, dass sich unter den Bedingungen der Thermoneutralpflege, die Wärmeverluste des Neonaten im Inkubator mit dessen Wärmeproduktion im Gleichgewicht befinden. In diesem Fall entsprechen die Wärmeverluste der Wärmeproduktion und damit dem Energieumsatz (Koch, 2017).

Formel zur Berechnung Energieumsatzes:

Die Berechnung des gesamten Energieumsatzes erfolgt gemäß folgender Formel:

$$\mathbf{EE_{RA}}\left(\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{kg \cdot d}}\right) = Q_{Konv} + Q_{Rad} + Q_{Evap} + Q_{RWL}$$

EE_{RA} = Energieumsatz des Rechenalgorithmus
Q_{Konv} = Konvektion
Q_{Rad} = Radiation
Q_{Evap} = Evaporation
Q_{RWL} = Respiratorischer Wärmeverlust

3 Material und Methoden

Für die hier durchgeführte klinische Beobachtungsstudie in Kooperation mit der Firma Drägerwerk AG & Co. KGaA aus Lübeck wurde ein prospektives Studiendesign gewählt.

Die Datenerhebung erfolgte von Juli 2015 bis Oktober 2016 auf der neonatologischen Intensiv- und Normalstation (5H und 5E) des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf.

Die Studie wurde vor Beginn der Untersuchungen von der Ethikkommission unter dem Aktenzeichen PV3781 der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg genehmigt.

3.1 Ein- und Ausschlusskriterien

3.1.1 Einschlusskriterien

In die Studie eingeschlossen wurden Frühgeborene mit einem Geburtsgewicht von über 700g, die im Inkubator Caleo® der Firma Drägerwerk AG & Co. KGaA versorgt wurden.

Vor Einschluss in die Studie erfolgte eine ausführliche Aufklärung der Eltern bzw. der Erziehungsberechtigten und es musste eine schriftliche Einwilligung dieser vorliegen.

3.1.2 Ausschlusskriterien

Es wurden Frühgeborene aus der Studie ausgeschlossen, bei denen eine schwerwiegende Grunderkrankung, wie z.B. eine syndromale Erkrankung oder eine Hirnblutung > 2. Grades vorlag. Ein weiteres Ausschlusskriterium war unter anderem die Verabreichung von Medikamenten, die bekanntermaßen Auswirkungen auf den Stoffwechsel haben (z.B. L-Thyroxin und Katecholamine). Eine Ausnahme stellte hier jedoch die Therapie mit Methylxanthienen (Coffein) dar, da dies alle Studienteilnehmer erhielten, stellte dies kein Ausschlusskriterium dar.

Darüber hinaus wurden Frühgeborene ausgeschlossen, die während des Zeitraums der Datenerhebung einen instabilen Allgemeinzustand z. B. im Rahmen einer Infektion oder Sepsis entwickelten.

3.2 Allgemeine Deskription des Studienkollektivs

Anhand der oben beschrieben Ein- und Ausschlusskriterien konnten insgesamt 40 Frühgeborene, der 25+5 bis 33+0 Schwangerschaftswoche (durchschnittliches Gestationsalter 30 Wochen) in die Studie eingeschlossen werden. Die Geschlechterverteilung sowie die Mehrlingshäufigkeit sind in Tabelle 2 dargestellt. In Tabelle 3 sind die Körpermaße bei Geburt aufgeführt.

Tabelle 2: Geschlechterverteilung und Mehrlingshäufigkeit

		Stichprobe (n)	**Prozent** (%)
Geschlechterverteilung	männlich	19	47,5
	weiblich	21	52,5
Einlingshäufigkeit		19	47,5
Mehrlingshäufigkeit	Zwillinge	19	47,5
	Drillinge	2	5,0

Tabelle 3: Körpermaße bei Geburt

n=40	**Körpergewicht** (kg)	**Kopfumfang** (cm)	**Körperlänge** (cm)
Mittelwert ($\bar{x}$)	1,267	27,5	38,1
Minimum (Min)	0,740	24,0	32,0
Maximum (Max)	1,825	30,5	46,0
Standardabweichung (SD)	0,266	1,611	2,692

3.3 Untersuchungszeitraum

Die 40 eingeschlossenen Frühgeborenen wurden maximal über 25 Tage beobachtet. Der individuelle Untersuchungszeitraum richtete sich dabei nach der Zeit, die die Studienteilnehmer im Inkubator versorgt wurden. Insgesamt konnten 18 Studienteilnehmer über die gesamten 25 Tage beobachtet und Daten erhoben werden. Die übrigen 22 Studienteilnehmer wiesen eine kürzere Beobachtungszeit auf. Die minimale Beobachtungsdauer lag in einem Fall bei 11 Tagen.

Tabelle 4: Beobachtungszeitraum in Tagen

	Tage
$\bar{x}$	22
Min	11
Max	25
SD	4,071

3.4 Studienprotokoll

Die Datenerhebung erfolgte pseudonymisiert. Dafür wurde für jeden Probanden ein Datenblatt zur Dokumentation erstellt (siehe Anhang 15.1).

Bei jedem Studienteilnehmer wurden neben der Geburtenanamnese (Geburtsdatum, Gestationsalter, Geburtsmodus, Geschlecht, Geburtsmaße) folgende Daten erhoben:

Die tägliche Dokumentation beinhaltete:

- Gestations- und Lebensalter
- Nahrungsform (inkl. Kaloriengehalt) und verabreichte Mahlzeiten
- Körpergewicht*
- Körpertemperatur (rektal)*
- Inkubatoreinstellungen (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit)
- Beatmungsform
- Medikamenteneinnahme
- Bekleidung bzw. Bedeckung durch Stoffwindeln/Decken

Die mit * markierten Messwerte wurden durch das Pflegepersonal erhoben. Die Körpermaße (Größe und Kopfumfang) wurden wöchentlich bestimmt.

Die Raumtemperatur und die Raumluftfeuchtigkeit wurden bei klimatisierten Räumlichkeiten auf 24,0°C bzw. 50% festgelegt.

Die Datenerfassung während der Wärmeflussmessung erfolgte auf einem separaten Datenblatt (siehe Anhang 15.2).

3.4.1 Standardmonitoring

Während des gesamten Beobachtungszeitraums wurden die Frühgeborenen gemäß des Standardmonitorings auf einer Intensivstation überwacht. Alle Frühgeborenen waren dementsprechend an einen Monitor angeschlossen, der kontinuierlich die Herzfrequenz, Sauerstoffsättigung und Atmung registrierte. Der Blutdruck wurde nicht-invasiv intermittierend gemessen (nach Riva Rocci).

3.5 Statistische Auswertung

Deskriptive Analysen, wie die Bestimmung von Mittelwerten ($\bar{x}$), Minima (Min), Maxima (Max) und Standardabweichungen wurden mit Microsoft Excel (Version Microsoft Office 365 ProPlus) durchgeführt. Für die weitere statistische Auswertung wurde zusätzlich zu Microsoft Excel das Statistikprogramm IBM SPSS Statistics (Version 29.0.2.0) verwendet. Der Vergleich zweier Gruppen erfolgte bei Einhaltung der entsprechenden Voraussetzungen mit einem gepaarten T-Test und Wilcoxon-Test. Ein p-Wert mit <0.05 wurde als signifikant angesehen. Dargestellt sind der Mittelwert inkl. Standarddeviation.

3.6 Funktionsweise des Wärmeflussdetektors

Die Wärmeflussmessungen erfolgten mit Doppelsensoren, die uns freundlicherweise zusammen mit dem dazugehörenden Monitorgerät von der Firma Drägerwerk AG & Co. KGaA zur Verfügung gestellt wurden. Das Messverfahren, inklusive der Sensoren, wurde unter der Patentnummer DE 100 38 247, DE 101 39 705 und US 20030117375 im Jahre 2003 patentiert (Koch, 2010).

Die Doppelsensoren bestehen aus zwei separaten NTC (Negative Temperature Coefficient) -Sensoren. Mit dem ersten Sensor (Th_1), welcher auf der Haut aufliegt, wird die Hauttemperatur der Frühgeborenen und mit dem zweiten Sensor (Th_2) die Temperatur in unmittelbarer Umgebung gemessen. Beide Sensoren sind durch eine Isolationsschicht mit bekanntem Wärmeübergangskoeffizienten K_s getrennt. Dieser K_s-Wert wird von der Firma Drägerwerk AG & Co. KGaA für jeden Doppelsensor individuell kalibriert. In dieser Arbeit wurden folgende Sensoren verwendet:

Stirn: Seriennummer 554 und K_s-Wert 55,14 $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$

Wade: Seriennummer 525 und K_s-Wert 54,19 $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$

Wärmeenergie fließt entsprechend dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik entlang eines Temperaturgradienten vom Ort der höheren zum Ort der niedrigeren Temperatur. Ein Wärmefluss kann daher nur dann bestimmt werden, wenn eine Temperaturdifferenz vorliegt. Die Doppelsensoren der Firma Dräger ermöglichen es den regionalen Wärmefluss (Q_2) zwischen der Hauttemperatur (Th_1) des Probanden und der Umgebung (Th_2) zu bestimmen. Dieser regionale Wärmefluss (Q_2) kann mit dem Wärmefluss im Gewebe (Q_1) gleichgesetzt werden (Koch, 2010).

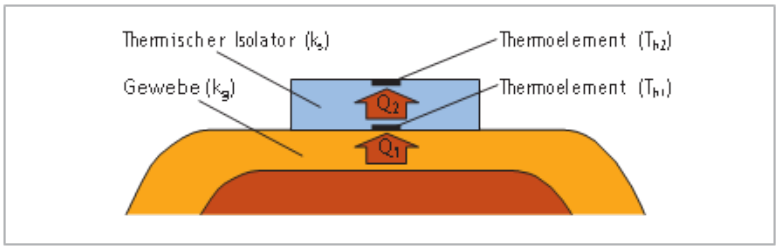


Abbildung 5: Schematischer Aufbau Doppelsensor (Kimberger et al., 2009)

Q_1 = Wärmefluss im Gewebe entspricht Q_2 = Wärmefluss im Sensor
Th_1 = Hauttemperatur
Th_2 = Temperatur des Sensors zur Umgebung
K_g = Wärmeübergangskoeffizent des Gewebes
K_s = Wärmeübergangskoeffizent des Sensors

Die folgende Abbildung zeigt einen Originalsensor, der in dieser Studie verwendet wurde:

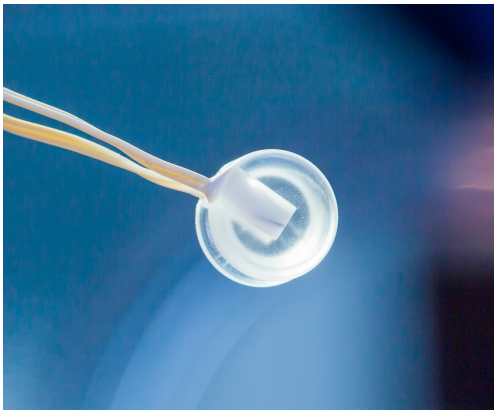


Abbildung 6: Doppelsensor (Beckmann, 2019)

3.7 Durchführung der Wärmeflussmessung

Vor dem Beginn der Wärmeflussmessung wurden die benötigten Sensoren und Kabel zunächst desinfiziert. Im Weiteren wurde der Aktivitätsgrad der Frühgeborenen bestimmt. Dazu wurde die Einteilung nach Brück und Freymond verwendet (Freymond et al., 1986).

Tabelle 5: Aktivitätsgrade nach Brück

+5	Weinen	
+4	Augen geöffnet	Gesamter Körper in Bewegung
+3	Augen geöffnet	Bewegung von Armen u./o. Beinen
+2	Augen geöffnet	Grimassieren
+1	Augen geöffnet	Keine Körperbewegung
0	Augen öffnen und schließen	Keine Körperbewegung
-1	Augen geschlossen	Gesamter Körper in Bewegung
-2	Augen geschlossen	Bewegung von Armen u./o. Beinen
-3	Augen geschlossen	Grimassieren
-4	Augen geschlossen	Keine Körperbewegung

Anschließend wurde jeweils ein Sensor auf der Stirn und auf der Wade platziert. Zur Befestigung des Stirnsensors wurde eine elastische CPAP-Mütze verwendet, der Sensor an der Wade wurde mit einer elastischen Fixierbinde befestigt. Die Wärmeflussmessung erfolgte im geschlossenen Inkubator. Während der Messung musste zur Vermeidung von Fehlmessungen insbesondere auf die korrekte Lage der Sensoren geachtet werden. Die Sensoren maßen die jeweiligen Temperaturen kontinuierlich und zeigten diese direkt auf dem dazugehörigen Monitor an (Abbildung 7).



Abbildung 7: Wärmeflussmessung ohne Fixierung (CPAP-Mütze) (Beckmann, 2019)

Nach einer mind. 10 minütigen Phase der thermischen Stabilisierung (Kimberger et al., 2009) wurden in einem 5 minütigen Intervall die von den Sensoren gemessenen Temperaturen auf dem entsprechenden Datenblatt notiert. Eine Wärmeflussmessung dauerte insgesamt 30 Minuten. Für die spätere Berechnung wurden aus den gemessenen Werten zum Ausgleich von Schwankungen ein Mittelwert gebildet.

3.7.1 Zeitpunkt der Wärmeflussmessung

Die Wärmeflussmessungen erfolgten zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten.

Die erste Wärmeflussmessung wurde am 10. (± 2) Lebenstag durchgeführt. Diese erfolgte bei 23 Frühgeborenen.
Die zweite Messung wurde am 20. (± 5) Lebenstag durchgeführt und erfolgte bei 20 Frühgeborenen. Bei 19 Studienteilnehmern konnten beide Messungen durchgeführt werden.

Anhand der Bestimmung des Aktivitätsgrades (vgl. Freymond Skala 0 bis 1) ergab sich als idealer Zeitpunkt für die Messung häufig die Zeit mittags nach dem morgendlichen Känguruhen/Bonding.

3.7.2 Abbruchkriterien für die Wärmeflussmessung

Die Wärmeflussmessung wurde abgebrochen sobald es zu einer Instabilität der Frühgeborenen kam oder die Kinder zu unruhig für eine Messung wurden. Hierfür wurde ebenfalls der Aktivitätsgrad nach Brück und Freymond herangezogen (Freymond et al., 1986). In dieser Arbeit wurden keine Daten verwendet, die aus abgebrochenen Messungen stammen.

3.7.3 Bestimmung des regionalen Energieumsatzes

Da sich der regionale Wärmefluss proportional zum regionalen Energieumsatz (EE_{reg}) verhält, kann dieser zur Bestimmung des regionalen Energieumsatzes verwendet werden. In dieser Arbeit bezieht sich der regionale Energieumsatz auf die Stirn bzw. die Wade.

Der hochgerechnete Energieumsatz, bezogen auf das Körpergewicht, berechnet sich hierbei entsprechend folgender Formel:

$$\mathbf{EE_{reg}}\left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}*\text{d}}\right]=\frac{((\mathbf{Th_1}-\mathbf{Th_2})(\text{K}))\cdot\boldsymbol{k_s}\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2*\text{K}}\right)\cdot\mathbf{A}(\text{m}^2)*\mathbf{0{,}859}\left(\frac{\text{kcal}}{\text{W}*\text{h}}\right)\cdot\mathbf{24}\left(\frac{\text{h}}{\text{d}}\right)*\mathbf{0{,}7}}{\mathbf{BW}\ (\text{kg})}$$

EE_{reg} = berechneter lokaler Energieumsatz

Th_1 = Hauttemperatur in Kelvin

Th_2 = Temperatur des Sensors zur Umgebung in Kelvin

K_s = Wärmeübertragungskoeffizent des Sensors in $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2*\text{K}}\right)$

A = Körperoberfläche nach Mosteller in m^2

$0{,}859\left(\frac{\text{kcal}}{\text{W}*\text{h}}\right)\cdot 24\left(\frac{\text{h}}{\text{d}}\right)$ = Umrechnung von Watt in $\frac{\text{kcal}}{\text{d}}$

0,7 = am Wärmeverlust beteiligte Körperoberfläche, die nicht auf der Matratze liegt

BW = Körpergewicht

Die Berechnung der Körperoberfläche erfolgte jeweils entsprechend der Formel nach Mosteller (Mosteller, 1987):

$$\mathbf{A}\ [\text{m}^2] = \sqrt{\frac{Größe\ (cm)*BW(kg)}{3600}}$$

BW = Körpergewicht

3.7.4 Bestimmung des gesamten Energieumsatzes

Der gesamte Wärmefluss und somit auch der gesamte Energieumsatz (EE_{DS}) der Frühgeborenen ergibt sich aus der Summe der einzelnen regionalen Wärmeflüsse bzw. der regionalen Energieumsätze. Hierfür werden die Wärmeflüsse hierfür mit der anteiligen Körperoberfläche der Körperregion multipliziert und anschließend die Werte addiert. Der Sensor, der an der Stirn angebracht wird, repräsentiert dabei den Kopf, Rumpf und das Genital. Der Sensor an der Wade repräsentiert die oberen und unteren Extremitäten. Für die genaue Berechnung des jeweiligen Prozentsatzes der Körperregionen wird die Neunerregel nach Wallace verwendet (Hettiaratchy and Papini, 2004).

Dementsprechend ergibt sich folgende Formel für den gesamten Energieumsatz:

$$\mathbf{EE_{DS}}\left[\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{kg*d}}\right]=\left((EE(Stirn)*0{,}55)+(EE(Wade)*0{,}45)\right)*\frac{2}{3}$$

EE_{DS} = Energieumsatz des Doppelsensors

3.8 Rechenalgorithmus zur Bestimmung des Energieumsatzes

Die Bestimmung des Energieumsatzes erfolgt nach einem Verfahren, das durch die Grundlagenentwicklung der Firma Drägerwerk AG & Co. KGaA entwickelt wurde. Das Verfahren ist unter der Patentnummer DE 10 2015 012 472 A1 im Jahre 2015 beim Deutschen Patent- und Markenamt angemeldet worden und wurde im Jahre 2017 offengelegt (Koch, 2017).

Der Rechenalgorithmus zur Bestimmung des Energieumsatzes beruht auf den Wärmeverlusten (Konvektion, Radiation, Evaporation und respiratorische Wärmeverluste) der Frühgeborenen. Ein Wärmeverlust via Konduktion (= Wärmeleitung), der sich in unserem Fall auf den Wärmetransfer zwischen der Haut und der Inkubatormatratze bezieht, konnte in dieser Studie jedoch vernachlässigt werden, da die Frühgeborenen im Inkubator auf gut isolierten Schaumstoffmatratzen liegen und daher der konduktive Wärmeverlust verschwindend gering ist (Wasner, 1994, Koch, 2017, Lyon and Oxley, 2001).

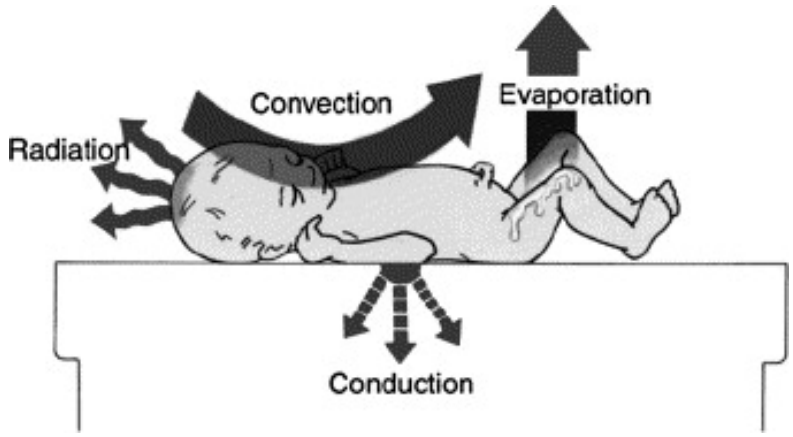


Abbildung 8: Wärmeverluste beim Neugeborenen (Çınar and Filiz, 2006)

Als Grundlage dient die Annahme, dass sich unter der Bedingung der Thermoneutralpflege, die Wärmeverluste mit der Wärmeproduktion des Probanden im Inkubator im Gleichgewicht befinden. In diesem Fall entsprechen die Wärmeverluste der Wärmeproduktion und damit dem Energieumsatz (Koch, 2017).

Die anteilige Höhe der unterschiedlichen Wärmeverluste ist dabei abhängig vom Lebens- und Gestationsalter, der thermischen Umgebung (Luftfeuchtigkeit und Umgebungstemperatur) sowie dem Kontakt zur Matratze und von der Bekleidungsart (Lyon et al., 1997, Lyon and Oxley, 2001). Darüber hinaus sind die Wärmeverluste abhängig von der Körperoberfläche der Studienteilnehmer (Lyon et al., 1997, Elabbassi et al., 2004).

Aus diesem Grund sind für die Berechnungen folgende Daten/Gegebenheiten notwendig:

- Versorgung des Studienteilnehmers in einem Inkubator
- Patientendaten (Gestationsalter, aktuelles Lebensalter, aktuelles Gewicht, aktuelle Größe)
- Raumtemperatur
- Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur im Inneren des Inkubators
- Bekleidung bzw. Bedeckung durch Stoffwindeln/Decken
- Normothermie des Studienteilnehmers (Körpertemperatur zw. 36,5-37,5°C)

Als Grundlage des Rechenalgorithmus diente das Heat Balance Programm der Firma Drägerwerk AG & Co. KGaA (Lyon and Oxley, 2001). Dieses Kalkulationsprogramm wurde zunächst entwickelt, um die Wärmebilanz von Frühgeborenen annäherungsweise zu bestimmen. Mit Hilfe der Wärmebilanz sollten die Inkubatoreinstellungen (Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur) individueller auf die Bedürfnisse der Frühgeborenen angepasst werden können (Wasner, 1994). Die hier verwendeten Algorithmen sind in Anlehnung an das Heat Balance Programm entstanden.

In einer vorausgegangenen Studie konnte stichprobenartig gezeigt werden, dass mit Hilfe dieses Verfahrens der Energieumsatz bestimmt werden kann (Beckmann, 2019).

Formel zur Berechnung des gesamten Energieumsatzes:

Die Berechnung des gesamten Energieumsatzes erfolgt gemäß folgender Formel:

$$\mathbf{EE_{RA}}\left(\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{kg}*\mathrm{d}}\right) = Q_{Konv}+Q_{Rad}+Q_{Evap}+Q_{RWL}$$

EE_{RA} = Energieumsatz des Rechenalgorithmus
Q_{Konv} = Konvektion
Q_{Rad} = Radiation
Q_{Evap} = Evaporation
Q_{RWL} = Respiratorischer Wärmeverlust

3.8.1 Berechnung der verschiedenen Wärmeverluste

Für die oben genannte Berechnung ist die Kenntnis der verschiedenen Wärmeverluste (Konvektion, Radiation, Evaporation und respiratorischer Wärmeverlust) notwendig. Diese wurden anhand folgender Formeln berechnet (Koch, 2017):

In der vorliegenden Studie ist die **Konvektion** (= Wärmeströmung, Q_{Konv}) abhängig von der Luftgeschwindigkeit, die im Inneren des Inkubators herrscht, der Körperoberfläche und der Temperaturdifferenz zwischen der Körper- und Umgebungstemperatur. Für diese Studie wurde die Luftgeschwindigkeit im Inneren des Inkubators im Labor bestimmt und ist daher gerätespezifisch (Koch, 2017).

$$\mathbf{Q_{Konv}} = (k1 * TI + k2) * A * k3 * (1 + k4 * FL)$$

k1-k4 = Konstanten
TI = Temperatur im inneren des Inkubators
A = Körperoberfläche nach Mosteller
FL = Luftgeschwindigkeit im Inkubator (gerätespezifischer Parameter)

Die **Radiation** (= Wärmestrahlung, Q_{Rad}) ist abhängig vom Verhältnis der Körperoberflächentemperatur zu den Inkubatorseitenwänden und der -decke (Koch, 2017).

$$\mathbf{Q_{Rad}} = k5 * (0{,}4 * A * (k6 - TD^4) + (0{,}3 * A(k6 - TS^4)$$

k5-k6 = Konstanten
TD = Temperatur der Decke des Inkubators
A = Körperoberfläche nach Mosteller
TS = Temperatur der Seitenwand des Inkubators

Da es sich in dieser Studie um Frühgeborene handelt, kommt der Wärmeabgabe mittels **Evaporation** (= Verdunstung, Q_{Evap}), insbesondere der Perspiratio insensibilis, ein besonderer Stellenwert zu. In verschiedenen Studien konnte ein Zusammenhang zwischen dem insensiblen Wasserverlust (= insensible water loss = IWL) und dem Gestationsalter, sowie dem aktuellen Lebensalter gezeigt werden (Sedin and Agren, 2006, Hammarlund and Sedin, 1979). Je geringer das Gestations- und das Lebensalter, umso höher ist der transepidermale Wasser- und damit auch der Wärmeverlust. Zudem ist der transepidermale Wasserverlust abhängig von der umgebenden Luftfeuchtigkeit (Sedin and Agren, 2006). Je niedriger die Luftfeuchtigkeit, desto höher der transepidermale Wasserverlust.

Die in dieser Arbeit verwendeten IWL-Werte stammen aus Tabellen der Firma Drägerwerk AG & Co. KGaA und entsprechen den Werten aus der Literatur (Hammarlund and Sedin, 1979) (siehe Anhang 15.4).

$$\mathbf{Q_{Evap}} = IWL50 * A * k7 * \big(1 + (FL * k8)\big) * (K9 - RH)$$

ILW50 = insensible water loss (siehe Tabelle 14: ILW-Werte)
A = Körperoberfläche nach Mosteller
k7-k9 = Konstanten
RH = Relative Feuchte

Der **respiratorischer Wärmeverlust** (= Q_{RWL}) wird dabei aus dem Atemminutenvolumen (AMV), der Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit berechnet (Koch, 2017).

$$\mathbf{Q_{RWL}} = deltaX * AMV * k10$$

deltaX = Differenz des absoluten Wassergehaltes zwischen der ein- und ausgeatmeten Luft
AMV = Atemminutenvolumen
K10 = Konstante

4 Ergebnisse

4.1 Wärmeflussmessungen

4.1.1 Studienkollektiv - Wärmeflussmessungen

Die erste Wärmeflussmessung konnte bei 23 Frühgeborenen durchgeführt werden. Darunter waren 12 Jungen und 11 Mädchen. Während der Messung erhielten 13 Frühgeborene eine CPAP-Atemunterstützung, ein Frühgeborenes wurde NIPPV (= noninvasive positive pressure ventilation) -atemunterstützt, zwei Frühgeborene waren während der Messung in einer CPAP-Pause und die übrigen sieben Studienteilnehmer atmeten spontan. Das Studienkollektiv der ersten Wärmeflussmessung ist in **Tabelle *6*** dargestellt:

Tabelle 6: Studienkollektiv der 1. Wärmeflussmessung

n=23	**Alter** (d)	**Gewicht** (kg)	**Länge** (cm)	**A** (m^2)	**Inkubator-temperatur** (°C)	**Inkubator-feuchte** (%)
$\bar{x}$	10	1,323	39,05	0,120	33	53
Min	9	0,869	31,50	0,090	31	45
Max	12	1,702	42,00	0,139	35	60
SD	0,752	0,248	2,578	0,015	0,759	5,194

Die zweite Messung wurde bei 20 Frühgeborenen durchgeführt. Davon waren 9 Studienteilnehmer männlich und 11 weiblich. Insgesamt atmeten 12 Frühgeborene während der Wärmeflussmessung spontan und die übrigen 8 erhielten eine CPAP-Atemunterstützung (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Studienkollektiv der 2. Wärmeflussmessung

n=20	Alter (d)	Gewicht (kg)	Länge (cm)	A (m^2)	Inkubator-temperatur (°C)	Inkubator-feuchte (%)
x̄	19	1,529	39,6	0,130	32,1	43,4
Min	15	1,056	34,0	0,100	30,5	30
Max	21	1,918	43,0	0,150	33,0	55
SD	1,725	0,241	2,453	0,014	0,626	7,877

Sowohl bei der ersten Wärmflussmessung, als auch bei der zweiten erhielt kein Studienteilnehmer eine Phototherapie im Rahmen einer Hyperbilirubinämie.

4.1.2 Ergebnisse der Wärmeflussmessungen

In den Tabelle 8 und Tabelle 9 sind die Ergebnisse der 1. und 2. Wärmeflussmessung dargestellt. Es wurden aus den durch die Doppelsensoren (an Stirn und Wade) gemessenen Temperaturen Mittelwerte, Minima, Maxima und Standardabweichungen bestimmt. Darüber hinaus wurde die Temperaturdifferenz (∆T) zwischen Th_1 und Th_2 berechnet.

Tabelle 8: Ergebnisse der 1. Wärmeflussmessung

n=23	Th_1 Stirn (°C)	Th_2 Stirn (°C)	Th_1 Wade (°C)	Th_2 Wade (°C)	∆T Stirn (K)	∆T Wade (K)
x̄	35,85	34,91	36,17	35,43	0,94	0,76
Min	34,41	33,31	35,13	34,29	0,70	0,40
Max	36,43	35,73	37,34	36,49	1,11	1,17
SD	0,504	0,536	0,539	0,621	0,131	0,205

∆T = Temperaturdifferenz Th_1-Th_2

Tabelle 9: Ergebnisse der 2. Wärmeflussmessung

n=20	Th_1 Stirn (°C)	Th_2 Stirn (°C)	Th_1 Wade (°C)	Th_2 Wade (°C)	ΔT Stirn (K)	ΔT Wade (K)
$\bar{x}$	35,66	34,53	35,79	34,91	1,13	0,88
Min	35,24	34,03	35,20	34,10	0,81	0,39
Max	36,37	35,30	36,73	36,34	1,44	1,17
SD	0,336	0,337	0,416	0,566	0,144	0,233

4.1.3 Energieumsatz - Wärmeflussmessung

Die Energieumsätze, die mit Hilfe der Wärmeflussmessungen bestimmt wurden, sind in Abbildung 9 dargestellt.

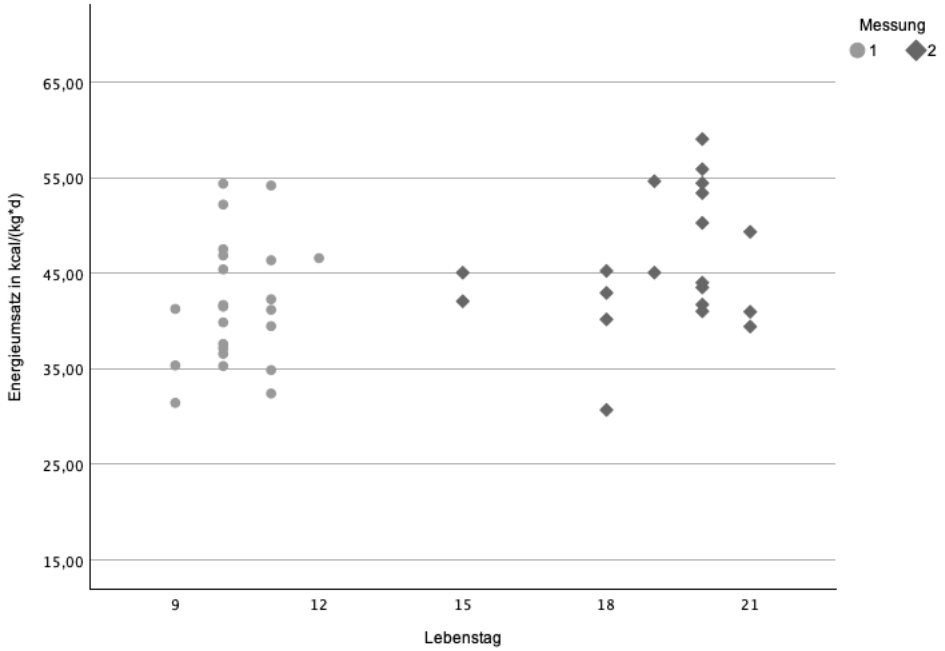


Abbildung 9: Ergebnisse Energieumsatz aller Wärmeflussmessungen

Unter Einsatz der erhobenen Werte aus der ersten Wärmeflussmessung ließ sich im Mittel ein Energieumsatz von 41,81 ± 6,534 kcal/(kg*d) (31,44 bis 54,39 kcal/(kg*d)) berechnen.

Mit den Ergebnissen der zweiten Wärmeflussmessung wurde mit Mittel ein Energieumsatz von 45,95 ± 6,940 kcal/(kg*d) (30,70 bis 59,05 kcal/(kg*d)) berechnet.

Tabelle 10: Deskriptive Statistik - Wärmeflussmessungen

	Messung 1 (n=23)	**Messung 2** (n=20)
$\bar{x}$	41,81	45,95
Min	31,44	30,70
Max	54,39	59,05
SD	6,534	6,940

4.2 Rechenalgorithmus

4.2.1 Studienkollektiv - Rechenalgorithmus

Der postnatale Energieumsatz konnte bei allen 40 Frühgeborenen, die in die Studie eingeschlossen wurden, anhand des Rechenalgorithmus berechnet werden. Ein vollständiges 25-tägiges Follow-Up konnte jedoch aufgrund der oben beschriebenen unterschiedlichen Inkubatorverweildauer (vgl. 3.3) nur bei einem Teil (n=18) des Studienkollektivs erfolgen.

4.2.2 Ergebnisse der unterschiedlichen Wärmeverluste

In Abbildung 10 sind die Mittelwerte der einzelnen Wärmeverluste (Konduktion (Q_{Konv}), Radiation (Q_{Rad}), Evaporation (Q_{Evap}) und respiratorischer Wärmeverlust (Q_{RWL})) über den Untersuchungszeitraum dargestellt, aus denen anschließend die individuellen Energieumsätze gemäß der oben beschriebenen Formel (vgl. Kapitel 3.8) berechnet wurden.

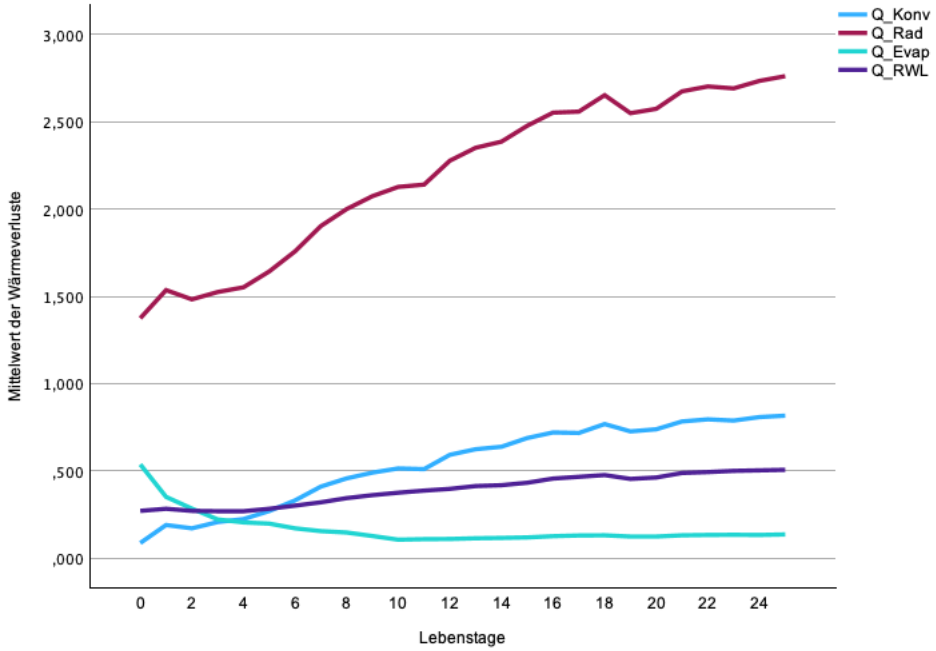


Abbildung 10: Mittelwerte der verschiedenen Wärmeverluste

4.2.3 Energieumsatz - Rechenalgorithmus

Aus den individuell berechneten Wärmeverlusten wurde anschließend der individuelle Energieumsatz berechnet. Diese sind in Abbildung 11 dargestellt.

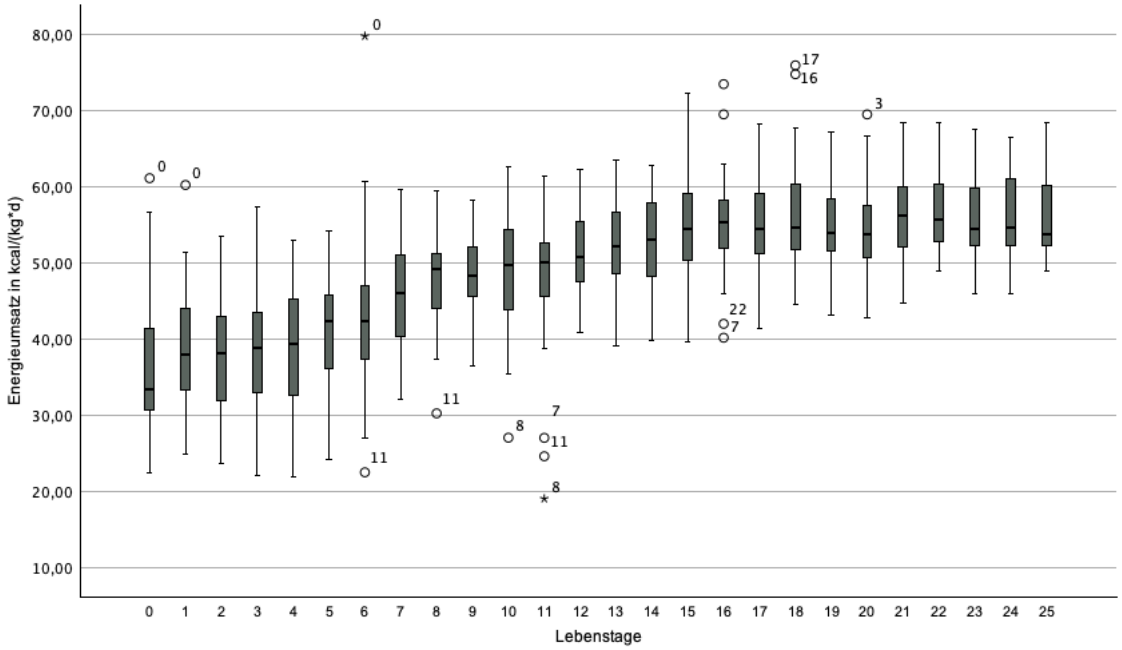


Abbildung 11: Ergebnisse Energieumsatz Rechenalgorithmus, tägliche Berechnung an vorhandenen Datensätzen n=18 bis 40

Die deskriptive Statistik ist in Tabelle 19 abgebildet und dem Anhang beigefügt.

5 Diskussion

5.1 Methodenkritik

5.1.1 Allgemein

Einhaltung der Grundumsatzbedingungen

Der Grundumsatz ist abhängig von einer Vielzahl an Faktoren (z.B. Alter, Geschlecht, Muskelmasse, Körpergröße und -gewicht). Daher unterliegt er einer großen Variabilität, was eine Bestimmung vergleichbarer Werte deutlich erschwert. Bei Erwachsenen erfolgt die Messung des Grundumsatzes nach folgenden, standardisierten Messbedingungen (Persson, 2019):

- Morgens (nach ausreichend Schlaf)
- Nüchtern (nach mind. 8 Stunden Nahrungskarenz)
- Im Liegen und während physischer und psychischer Ruhe
- In thermoneutraler Umgebung bei normaler Körpertemperatur

Die Einhaltung dieser Messbedingungen zur Bestimmung des Grundumsatzes/ Energieumsatzes ist bei Frühgeborenen auf diese Weise nicht möglich, da sie nicht mit einer physiologischen Entwicklung und entsprechenden Versorgung einhergehen. Dennoch wurde versucht, möglichst vergleichbare Bedingungen zu schaffen, die sich mit der Versorgung der Frühgeborenen vereinbaren lässt.

Messzeitpunkt und Nahrungsaufnahme

Die Wärmeflussmessungen fanden größtenteils mittags, nach dem morgendlichen Bonding und meist nach einer Mahlzeit statt. Zu diesem Zeitpunkt waren die Frühgeborenen entspannt und schliefen größtenteils. Dadurch konnte vermieden werden, dass eine durch körperliche Aktivität bedingte Grundumsatzerhöhung die Energieumsatzbestimmung negativ, beeinflusste.

Der Abstand zwischen einer Wärmeflussmessung und der Nahrungsaufnahme war unterschiedlich. Vorangegangene Studien konnten zeigen, dass die Nahrungsaufnahme, vor allem innerhalb der ersten 30 Minuten postprandial, für einen Anstieg des Energieumsatzes sorgt (Schulze et al., 1981, Calcagno et al., 2019). Dieser Effekt wird als spezifisch dynamische Wirkung der Nahrung bezeichnet (Kraut et al., 1981). Allerdings konnte auch gezeigt werden, dass dieser Effekt umso geringer ist desto mehr Mahlzeiten die Probanden erhalten (Freymond et al., 1986). In der vorliegenden Arbeit haben die Studienteilnehmer zu den Messzeitpunkten zwischen 8 bis 12 Mahlzeiten pro Tag erhalten.

Umgebungsfaktoren (Thermoneutralität)

Alle Studienteilnehmer wurden in einem Inkubator versorgt, der optimal auf die Bedürfnisse der Frühgeborenen eingestellt war. Durch die hieraus resultierende Thermoneutralität wurde thermaler Stress und somit eine Energieumsatzerhöhung vermieden. Die Messelektroden wurden mittels CPAP-Mütze und elastischen Fixierbinde fixiert. Dies hat keinen Effekt auf die Thermoneutralität.

Bekleidung/Bedeckung

Alle Frühgeborene waren ganz oder teilweise durch Stoffwindeln oder andere Lagerungshilfen bedeckt. Dies sorgt dafür, dass die evaporativen Wärmeverluste verringert werden (Bell, 1983). Dieser Einfluss auf den Energieumsatz wurde in der Berechnung der individuellen Energieumsätze berücksichtigt.

Körperposition

Ein weiterer Kritikpunkt ergibt sich aus der Durchführung der Wärmeflussmessungen in unterschiedlichen Körperpositionen (Bauch-, Rücken- und Seitenlage). Vorangegangene Studien haben gezeigt, dass die Körperposition Einfluss auf den gemessenen Energieumsatz hat. In Bauchlage fiel der Energieumsatz geringer aus als in Rückenlage (Ammari et al., 2009, Tuffnell et al., 1995, Bell et al., 2017). In dieser Arbeit erfolgten lediglich vier der insgesamt 43 Wärmeflussmessungen in Bauchlage. Diese vier Messungen waren allesamt erste Messungen. Alle anderen Messungen erfolgten in Rücken- oder Seitenlage. Bei Betrachtung der einzelnen Ergebnisse ist in dieser Arbeit kein Unterschied zu erkennen.

Aktivitätszustand

Der Energieumsatz ist abhängig vom Aktivitätszustand. Bereits Freymond konnte zeigen, dass es zu einem Energieumsatzanstieg kommt, wenn die Probanden nicht vollständig entspannt und ruhig sind (Freymond et al., 1986). Wie bereits in Kapitel 3.7.2 beschrieben, fanden daher nur Wärmeflussmessung in körperlicher Ruhe statt (vgl. Freymond Skala 0 bis 1).

Heterogenes Patientenkollektiv

Die in dieser Arbeit eingeschlossenen Studienteilnehmer bilden, trotz den oben beschriebenen Auswahlkriterien, ein sehr heterogenes Kollektiv. So wurden unter anderem Frühgeborene zwischen der 26. und 34. Schwangerschaftswoche eingeschlossen. Diese Altersspanne alleine sorgt dafür, dass es zu einer größeren Varianz der Ergebnisse kommen kann. Ursächlich hierfür ist die unterschiedliche Reife der Frühgeborenen. Extrem Frühgeborene (< 28 Schwangerschaftswochen) weisen eine deutlich dünnere Haut auf und haben kaum Unterhautfettgewebe. Diese Faktoren sorgen dafür, dass der transepidermale Wärmeverlust deutlich größer ausfällt als bei Frühgeborenen mit höherem Gestationsalter (Rutter, 2000, Sedin and Agren, 2006). Der größere Wärmeverlust wiederum nimmt Einfluss auf den Energieumsatz. Frühere Studien konnten zeigen, dass extreme Frühgeburtlichkeit mit einem höheren Energieumsatz korreliert (Hulzebos and Sauer, 2007).

Ermittlung Körpermaße

In die Berechnung des Energieumsatzes fliest die Körperoberfläche der Studienteilnehmer mit ein. Grundlage hierfür sind die Körpergröße und das Körpergewicht.

Insbesondere in den ersten Lebenstagen wurde teilweise nur jeden zweiten Tag das Körpergewicht ermittelt. Um aber die Berechnung täglich durchführen zu können wurde der Mittelwert der zwei Gewichte ermittelt. Diese Schätzung des Körpergewichtes an den jeweiligen Tagen kann als ein Ungenauigkeitsfaktor angesehen werden.

Die Körpergröße wurde gemäß Standard am Tag der Geburt, sowie im Verlauf wöchentlich bestimmt. Hierbei zeigte sich allerdings eine deutliche Streuung der erhobenen Werte. Teilweise ergab sich aus fehlerhaften Messungen ein negatives Längenwachstum, was dafür sorgte, dass der Energieumsatz zu gering berechnet wurde.

5.1.2 Messmethoden

Indirekte Kalorimetrie

Der Goldstandard für Energieumsatzbestimmungen ist die Durchführung einer indirekten Kalorimetrie. Für diese Arbeit stand diese Messmethode nicht zur Verfügung. Vorangegangene Studien konnten bereits zeigen, dass der Energieumsatz auch durch Wärmeflussmessungen abgebildet werden kann (Beckmann, 2019, Perzlmaier, 1999). Dementsprechend werden in dieser Arbeit die Ergebnisse der Wärmeflussmessungen als Grundlage für einen Vergleich mit den Ergebnissen des Rechenalgorithmus herangezogen.

Wärmefluss

Die Durchführung einer Wärmeflussmessung ist per se unkompliziert. Wie beschrieben (vgl. 3.7) werden die Messsensoren platziert und die gemessen Werte notiert. Potenzielle Fehlerquellen sind dabei neben einer fehlenden oder nicht erfolgreichen Kalibrierung vor allem eine inkorrekte Sensorlage. Durch die teilweise hohe Luftfeuchtigkeit im Inneren des Inkubators und durch Bewegung der Studienteilnehmer kann es zu einer unbemerkten Lageveränderung der Messsensoren kommen. In diesem Fall würde eine falsche Temperatur gemessen, welche dann in der sich anschließenden Energieumsatz-berechnung zu den falschen Ergebnissen führen würde. Aus diesem Grund wurde regelmäßig optisch die Sensorlage überprüft, um diese Fehlerquelle möglichst gering zu halten.

Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass die evaporativen Wasserverluste nicht berücksichtigt werden. Es werden lediglich die trockenen Wärmeverluste bestimmt. Dies führt zu einer zu geringen Bestimmung des Energieumsatzes. Diese Tatsache fällt besonders bei sehr unreifen Frühgeborenen ins Gewicht, welche aufgrund ihrer unreifen Hautbarriere im Vergleich zu reifen Neugeborenen einen deutlich erhöhten transepidermalen Wasserverlust aufweisen (Rutter, 2000, Sedin and Agren, 2006). Um ein korrekteres Ergebnis zu erhalten müsste man die feuchten Wärmeverluste entsprechend addieren (Perzlmaier, 1999).

Rechenalgorithmus

Der angewandte Rechenalgorithmus fand bereits in früheren Arbeiten Anwendung und beruht auf physikalischen Gleichungen (Beckmann, 2019). In den vorangegangenen Arbeiten wurden die Formeln vor allem dazu verwendet, die Inkubatortemperatur zu berechnen (Lyon and Oxley, 2001). Ziel dieser Arbeit war es, den Energieumsatz zu berechnen und die Ergebnisse zu validieren. Hierfür wurden die Formeln lediglich umgestellt, weshalb man davon ausgehen kann, dass die verwendeten Formeln plausibel sind.

5.2 Postnataler Energieumsatzanstieg

Im Weiteren erfolgt die Diskussion der Ergebnisse bezüglich des postnatalen Energieumsatzanstieges. Hierbei werden nur die Daten der Probanden berücksichtigt, bei denen der Energieumsatz mittels Wärmeflussmessung bestimmt und auch zeitgleich eine Berechnung erfolgen konnte, n=19.

5.2.1 Energieumsatzanstieg mittels Wärmeflussmessung

Die Wärmeflussmessungen wurden durchgeführt, um den Energieumsatz der Studienteilnehmer zu bestimmen und damit den Rechenalgorithmus zu verifizieren. Anschließend wurden die erhobenen Ergebnisse statistisch mittels SPSS analysiert. In dieser Auswertung wurden alle Studienteilnehmer eingeschlossen, die beiden Messung (1 und 2) teilgenommen haben, n=19. Mit der statistischen Auswertung sollte überprüft werden, ob es zu einem signifikanten Anstieg der Energieumsatzergebnisse zwischen den zwei Messpunkt gekommen ist. Dafür wurde ein Wilcoxon-Test durchgeführt, da die verbundenen Stichproben keiner Normalverteilung entsprachen.

In diesem Studienkollektiv wurde bei der ersten Wärmeflussmessung ein Energieumsatz von 40,79 ± 6,320 kcal/(kg*d) (31,44 bis 54,19 kcal/(kg*d)), sowie von 46,76 ± 6,102 kcal/(kg*d) (39,43 bis 59,05 kcal/(kg*d)) bei der zweiten Wärmeflussmessung erhoben.

Es konnte gezeigt werden, dass es zwischen den zwei Messzeitpunkten zu einem signifikanten Anstieg kommt, $p<0.05$ (siehe Abbildung 12). Der ermittelte Anstieg betrug 5,96 ± 7,173 kcal/(kg*d) (-5,62 bis 27,61 kcal/(kg*d). Dieser ermittelte Anstieg entspricht den Daten aus der Literatur (vgl. Tabelle 13).

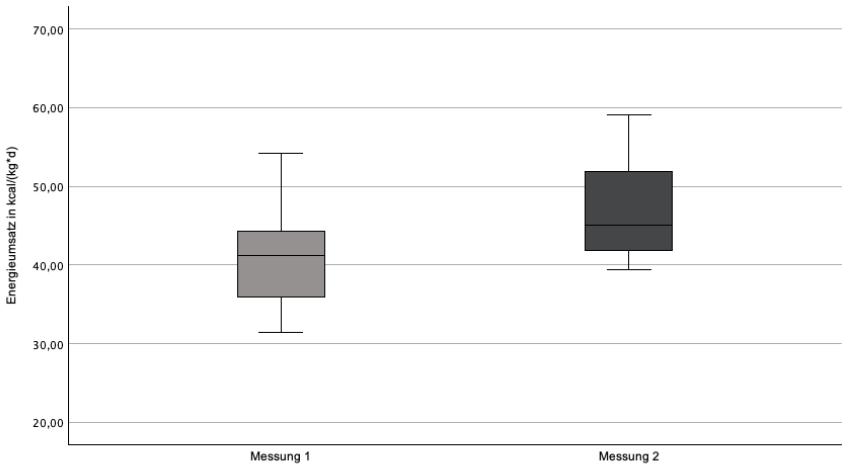


Abbildung 12: Energieumsatz bestimmt durch Wärmeflussmessungen zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten (n=19; $p<0.05$)

5.2.2 Energieumsatzanstieg mittels Rechenalgorithmus

Betrachtet man die Ergebnisse zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten (n=19), die durch den Rechenalgorithmus bestimmt wurden, konnte ebenfalls ein signifikanter Anstieg mit einem $p<0.05$ erhoben werden. Die statistische Auswertung erfolgte mittels eines gepaarten t-Testes.

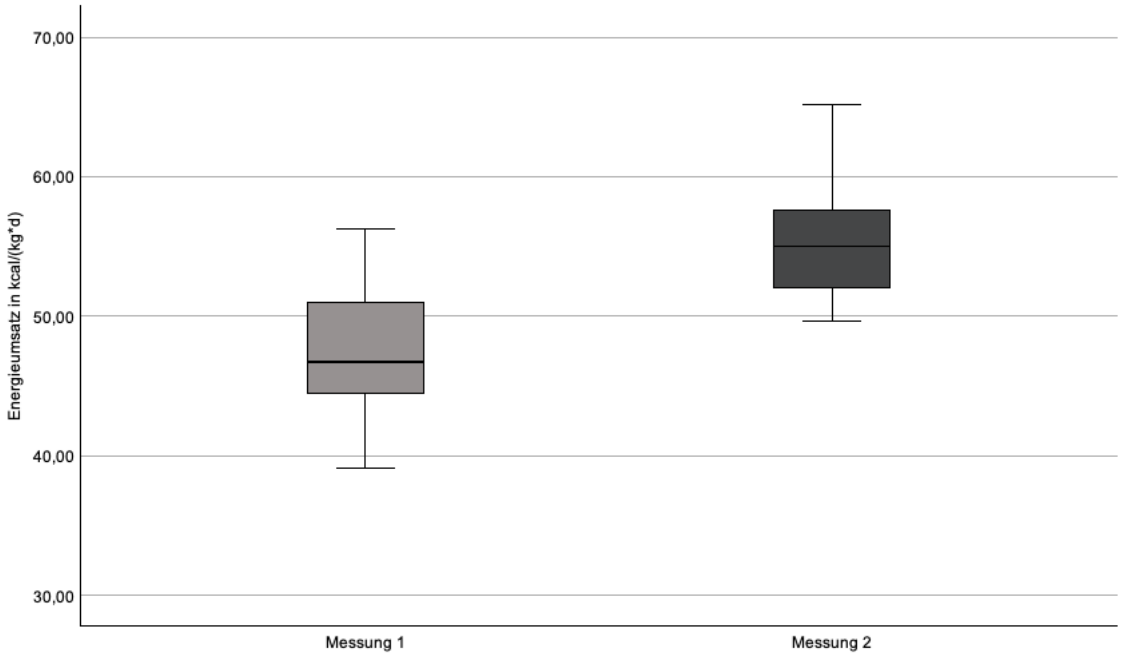


Abbildung 13: Energieumsatz bestimmt durch den Rechenalgorithmus zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten (n=19; p<0.05)

In diesem Studienkollektiv wurde bei der ersten Berechnung (Lebenstag 10 ± 2) ein Energieumsatz von 47,77 ± 4,651 kcal/(kg*d) (39,09 bis 56,31 kcal/(kg*d)), sowie von 55,46 ± 4,521 kcal/(kg*d) (49,69 bis 65,18 kcal/(kg*d)) bei der zweiten Berechnung (Lebenstag 20 ± 5) erhoben.

5.2.3 Vergleich Wärmeflussmessung und Rechenalgorithmus

Bei einem Teil der Studienpopulation (n=19) wurden sowohl Wärmeflussmessungen zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten als auch die Energieumsatzermittlung anhand des zu untersuchenden Rechenalgorithmus durchgeführt. In Abbildung 14 ist der Vergleich dieser Studienpopulation dargestellt.

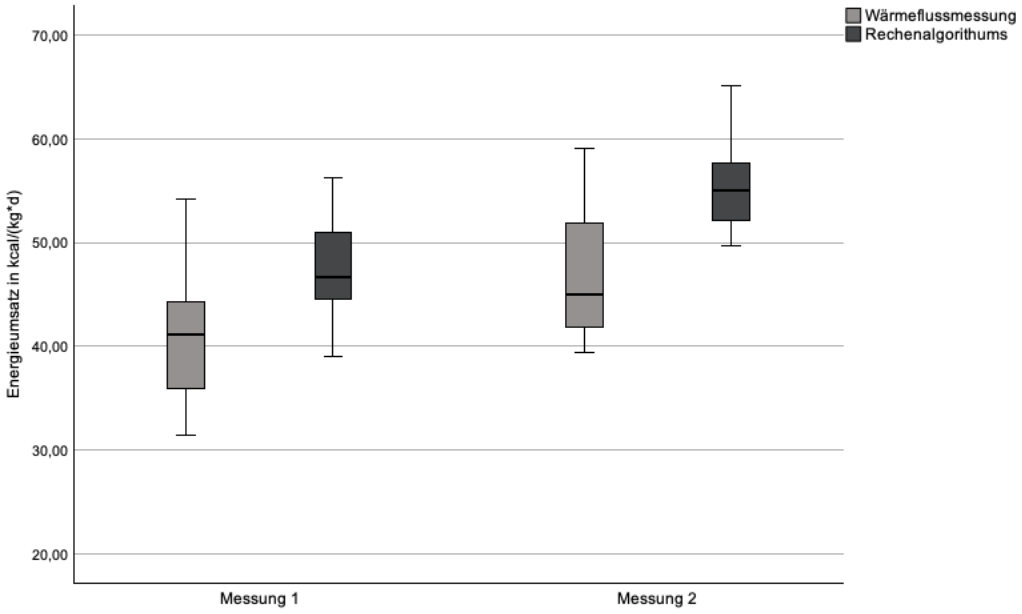


Abbildung 14: Vergleich Energieumsatz durch zwei unterschiedliche Messmethoden (n=19; p<0.05)

Beide Messungen bilden den in der Literatur bereits mehrfach beschriebenen Energieumsatzanstieg in den ersten Lebenswochen klar ab. Der Energieumsatzanstieg beider Messmethoden ist mit einem $p<0.05$ signifikant (siehe 5.2.1 und 5.2.2).

Auffällig ist jedoch, dass der Rechenalgorithmus die Werte für den Energieumsatz höher ermittelt als die Wärmeflussmessungen. Ein möglicher Grund hierfür wurde bereits in Kapitel 5.1.2 diskutiert. Die Wärmeflussmessung bildet lediglich die trockenen Wärmeverluste ab und dementsprechend niedriger fallen die Ergebnisse aus. Diese Gegebenheit konnte bereits in einer vorangegangenen Arbeit gezeigt werden (Beckmann, 2019). Allerdings stellt sich die Frage, ob die Vernachlässigung der evaporativen Wärmeverluste alleine für eine so große Differenz verantwortlich ist. Dies lässt sich mit der vorliegenden Arbeit jedoch nicht abschließend klären und benötigt weitere Untersuchungen.

In Tabelle 11 und Tabelle 12 sind die erhobenen Werte im direkten Vergleich dargestellt.

Tabelle 11: Vergleich Messung 1 Wärmefluss und Rechenalgorithmus

n=19	**Wärmefluss** (kcal/(kg*d))	**Rechenalgorithmus** (kcal/(kg*d))	**Differenz** (kcal/(kg*d))
$\bar{x}$	40,79	47,77	6,98
Min	31,44	39,09	
Max	54,19	56,31	
SD	6,320	4,651	

Tabelle 12: Vergleich Messung 2 Wärmefluss und Rechenalgorithmus

n=19	**Wärmefluss** (kcal/(kg*d))	**Rechenalgorithmus** (kcal/(kg*d))	**Differenz** (kcal/(kg*d))
$\bar{x}$	46,76	55,46	8,70
Min	39,43	49,69	
Max	59,05	65,18	
SD	6,102	4,521	

Der ermittelte Energieumsatz durch den Rechenalgorithmus liegt im Vergleich zur Wärmeflussmessung in der ersten Messung um ca. 14,6% höher. Für die zweite Messung konnte ein um ca. 15,7% höherer Wert ermittelt werden.

5.2.4 Korrelation zwischen dem Energieumsatz und den Umgebungsfaktoren (Inkubatoreinstellungen)

In zahlreichen, zurückliegenden Studien konnte bereits ein Zusammenhang zwischen Energieumsatz und steigendem Körpergewicht, als auch zwischen Energieumsatz und Energiezufuhr gezeigt werden.

Im Nachfolgenden wird der Zusammenhang zwischen dem gemessenen und berechneten Energieumsatz und der Inkubatortemperatur sowie der Inkubatorfeuchtigkeit untersucht. Dies erfolgte mittels einer einfachen linearen Regressionsanalyse.

Inkubatortemperatur

In Abbildung 15 ist der ermittelte Energieumsatz durch die Wärmeflussmessungen (zu zwei Messzeitpunkten) und die Inkubatortemperatur zum jeweiligen Zeitpunkt aufgetragen. Mittels Regressionsanalyse konnte gezeigt werden, dass es eine signifikante Korrelation (p=0.012) zwischen dem Energieumsatz und der Inkubatortemperatur gibt. Der Determinationskoeffizient (R^2) liegt allerdings bei lediglich 16,2%. Dennoch konnte der Ursprungsgedanke, dass ein steigendender Energieumsatz mit einer abnehmenden Inkubatortemperatur einhergeht, in Bezug auf die Wärmeflussmessungen gezeigt werden.

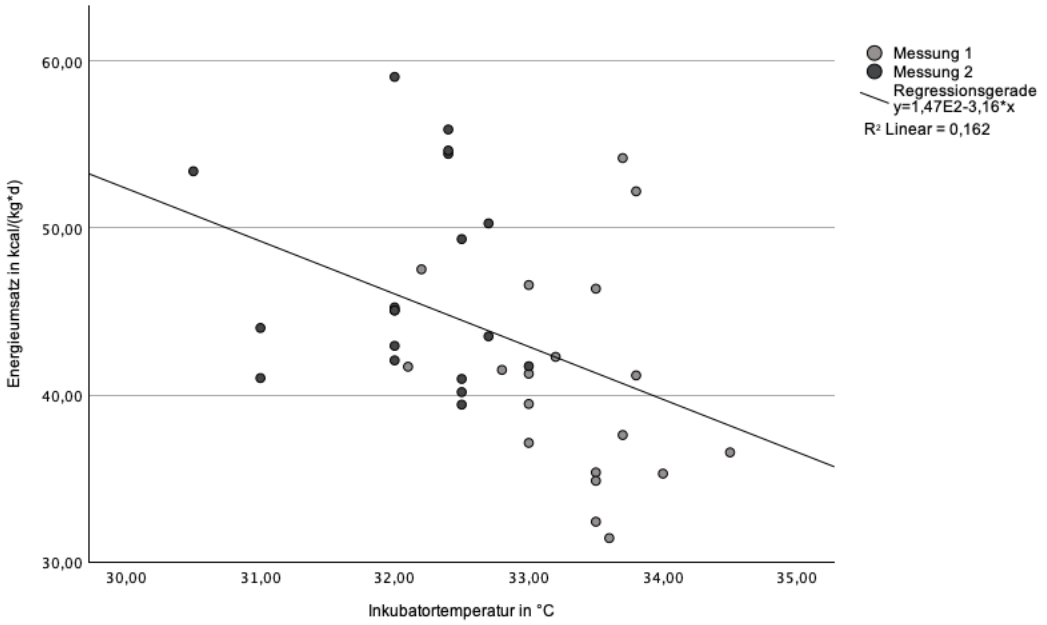


Abbildung 15: Vergleich Inkubatortemperatur mit dem Energieumsatz durch die Wärmeflussmessungen (p=0.012)

Die Analyse der Inkubatortemperatur und der Energieumsatzwerte ermittelt durch den Rechenalgorithmus zeigt ebenfalls eine signifikante Korrelation ($p<0.001$, siehe Abbildung 16). Der Determinationskoeffizient (R^2) liegt jedoch bei 85,5%. Aus der Grafik ist ersichtlich, dass der Energieumsatz umso geringer ist, je höher die Inkubatortemperatur ist. Dies lässt sich am ehesten darauf zurückführen, dass Frühgeborene, vor allem in den ersten Lebenstagen, viel Wärme zur Aufrechterhaltung einer konstanten Körpertemperatur benötigen. Des Weiteren liegt zu diesem Zeitpunkt die Energieumsatzrate noch auf einem niedrigen Niveau (vgl. 2.1.2).

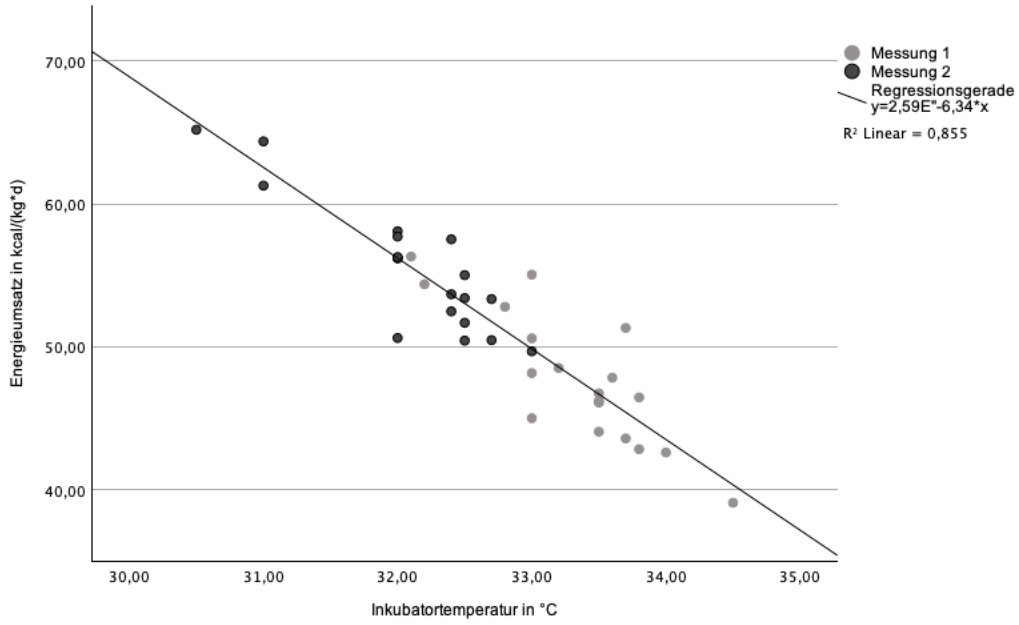


Abbildung 16: Vergleich Inkubatortemperatur mit dem Energieumsatz durch den Rechenalgorithmus ($p<0.001$)

Ursächlich für die unterschiedlichen Ergebnisse der beiden Korrelationen sind unter anderem die unterschiedlichen Methoden mit denen der Energieumsatz bestimmt wurde. Während sich die Werte die durch den Rechenalgorithmus bestimmt wurden sehr ähneln, liegt bei den Ergebnissen der Wärmeflussmessung eine erhebliche Streuung vor. Diese lässt sich unter anderem dadurch erklären, dass das Verfahren der Wärmeflussmessung lediglich zwei Messsensoren verwendet, die schließlich den gesamten „Körper“ abbilden sollen. Außerdem sind die Sensoren sehr sensibel in Bezug auf Hautkontakt, Inkubator-temperatur, sowie Kleidungs- und Zudeckeinfluss.

Inkubatorfeuchtigkeit

Die Regressionsanalysen zwischen Energieumsatz und Inkubatorfeuchtigkeit liefern ähnliche Ergebnisse wie der Vergleich des Energieumsatzes und der Inkubatortemperatur (siehe oben). Während zwischen den, durch die Wärmeflussmessungen ermittelten, Energieumsatzwerten und der Luftfeuchtigkeit im Inneren des Inkubators (Abbildung 17), kein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden konnte (p=0.795, Determinationskoeffizient (R^2) 0,2%.) zeigen die Ergebnisse, die mit Hilfe des Rechenalgorithmus berechnet wurden einen signifikanten Zusammenhang (p<0.001, Determinationskoeffizient (R^2) 49,3%; vgl. Abbildung 18).

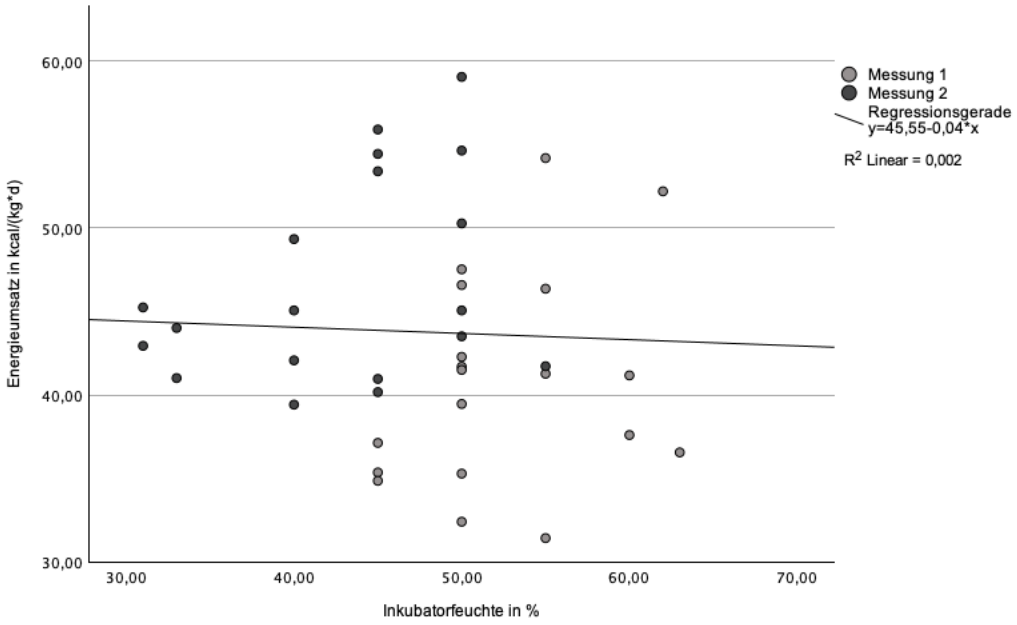


Abbildung 17: Vergleich Inkubatorfeuchtigkeit mit dem Energieumsatz durch Wärmeflussmessungen (p=0.795)

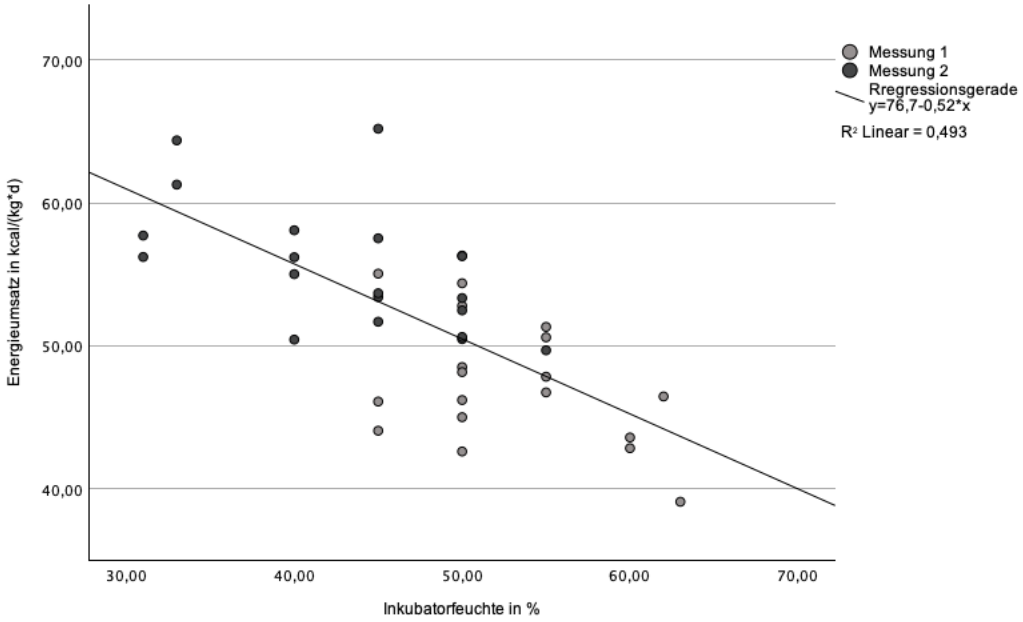


Abbildung 18: Vergleich Inkubatorfeuchtigkeit mit dem Energieumsatz durch den Rechenalgorithmus ($p<0.001$)

Es zeigt sich, dass eine hohe Luftfeuchtigkeit im Inkubator mit einer niedrigeren Energieumsatzrate einhergeht.

Diese Beobachtungen finden bereits seit langem in der Praxis Anwendung. Bei Frühgeborenen wird in der Regel in den ersten Lebenstagen aufgrund ihrer hohen evaporativen Wärmeverluste eine hohe Luftfeuchtigkeit eingestellt. Allerdings ist zu bedenken, dass dies meist auf standardisierten Einstellungen beruht (Temperatur, Luftfeuchtigkeit), welche der Standardliteratur entnommen sind oder hausinternen Standards entsprechen, und nicht patientenindividualisiert erfolgt.

5.3 Vergleich der Ergebnisse mit Daten aus der Literatur

Die Bestimmung des Energieumsatzes von Frühgeborenen war bereits Gegenstand zahlreicher Studien und reicht bis in das letzte Jahrhundert zurück.
Im vorliegenden Kapitel soll nun ein Literaturvergleich erfolgen, um die Studienergebnisse zu validieren und zu überprüfen, ob eine Energieumsatzbestimmung alleine durch einen Rechenalgorithmus ohne zusätzliche Messapparaturen möglich ist um somit dem Trend eines kontaktlosen Monitorings in der Neonatologie einen Schritt näher zu kommen.

Im Jahre 1981 untersuchte **Chessex et al.** bei 13 Frühgeborene mit einem Gestationsalter von 29.3 ± 0.4 Schwangerschaftswochen den Energieumsatz mittels indirekter Kalorimetrie. Es konnte gezeigt werden, dass der Energieumsatz innerhalb der ersten Lebenswoche von ca. 52 kcal/(kg*d) auf ca. 62 kcal/(kg*d) in der zweiten Woche und schließlich auf ca. 65 kcal/(kg*d) in der dritten Woche ansteigt (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20).

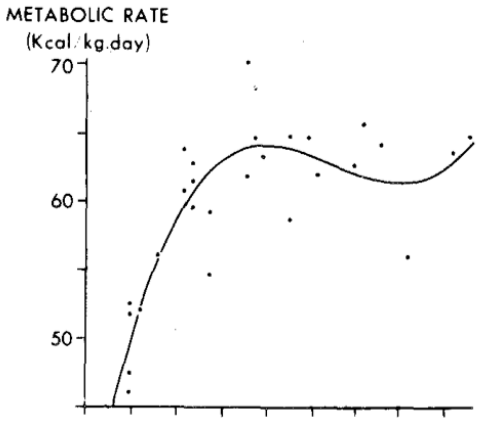


Abbildung 19: Energieumsatz über 40 Lebenstage (Chessex et al., 1981)

Table III. Metabolic rate (MR, kcal/kg/day), energy intake (EI, kcal/kg/day), and weight gain (WtG, gm/kg/day) of three sequentially studied premature infants

Infant	*Age (m ± SE, day)*	*First week (5.3 ± 0.3)*	*Second week (11.6 ± 0.3)*	*After the third week (26.3 ± 2.4)*
1	MR	52.1	64.3	66.0
	EI	119.5	150.9	157.8
	WtG	0	18.5	18.8
2	MR	52.4	61.9	65.1
	EI	112.7	159.0	156.4
	WtG	1.1	15.7	20.7
3	MR	52.8	60.0	65.2
	EI	116.2	133.7	151.9
	WtG	0	11.75	15.93

Abbildung 20: Energieumsatz, Nahrungszufuhr und Gewichtszunahme in den ersten Lebenswochen (Chessex et al., 1981)

1999 untersuchte **DeMarie et al.** ebenfalls mittels indirekter Kalorimetrie den Energieumsatz bei 18 Frühgeborene mit einem Gestationsalter 27.9 ± 0.6 Schwangerschaftswochen. Hier zeigte sich ein ähnlicher Verlauf, innerhalb der ersten Lebenstage konnte ein steilerer Anstieg (10. Lebenstag ca. 52,6 kcal/(kg*d) dokumentiert werden als in den folgenden Wochen (20. Lebenstag ca. 65,6 kcal/(kg*d)) (siehe Abbildung 21).

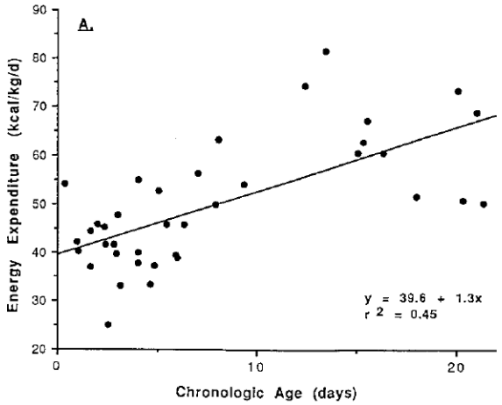


Abbildung 21: Energieumsatzverlauf mit zunehmendem Alter (DeMarie et al., 1999)

Karl Bauer et al. untersuchte 2003 26 Frühgeborene mit einem Gestationsalter von durchschnittlich 27 (23-29) Schwangerschaftswochen. Seine Arbeit zeigte ebenfalls den höheren Energieumsatzanstieg in den ersten 5 bis 10 Lebenstagen und den langsameren Anstieg in den folgenden Tagen/ Wochen (siehe Abbildung 22). So konnte er am ersten Lebenstag einen Energieumsatz von 29 ± 6 kcal/(kg*d) bestimmen, an Lebenstag 10 von 42 ± 7 kcal/(kg*d) und schließlich am 21. Lebenstag von 53 ± 6 kcal/(kg*d) (Bauer et al., 2003b).

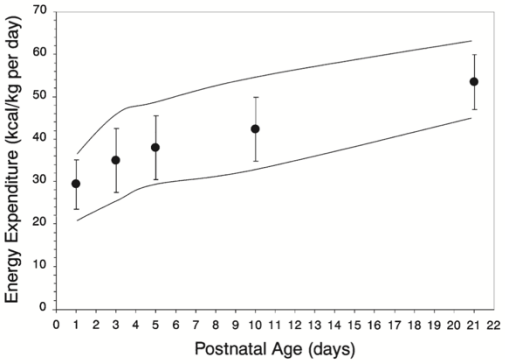


Fig 1. Energy expenditure in 26 preterm neonates studied. Data are mean ± SD of 26 measurements each. Lines represent 10th and 90th percentiles.

Abbildung 22: Verlauf des Energieumsatzes über 22 Lebenstage (Bauer et al., 2003b)

Im Jahre 2018 führte **Abranches et al.** bei 61 Frühgeborenen Energieumsatzbestimmungen mittels indirekter Kalorimetrie durch.

Hierbei handelte es sich um 43 eutrophe Frühgeborene (AGA) und 18 „small for gestational age“ Frühgeborene (SGA). Der Energieumsatz wurde am 7., 14., 21. und 28. Lebenstag sowie bei Entlassung bestimmt.

Die Studie zeigte einen kontinuierlichen Anstieg des Energieumsatzes mit zunehmendem Lebensalter. Außerdem konnte kein statistischer Unterschied zwischen den Energieumsatzergebnissen innerhalb der zwei Gruppen nachgewiesen werden. Am 7. Lebenstag wiesen die Studienteilnehmer einen Energieumsatz von 44,1 kcal/(kg*d) (AGA) bzw. 46,7 kcal/(kg*d) (SGA) auf der dann bis zum 21. Lebenstag auf 54,3 kcal/(kg*d) (AGA) bzw. 53,7 kcal/(kg*d) anstieg (vgl. Abbildung 23).

	AGA ($n = 43$)	SGA ($n = 18$)	p
REE			
7th day	44.1 (15.1)	46.7 (10.3)	0.98
14th day	46.3 (12.3)	50.7 (19.5)	0.07
21st day	54.3 (13.1)	53.7 (17.4)	0.46
28th day	55.7 (14.3)	57.0 (13.1)	0.99
Hospital discharge	54.8 (11.0)	54.3 (20.3)	0.99
Weight			
7th day	1353 (261)	1325 (228)	0.38
14th day	1415 (324)	1414 (220)	0.71
21st day	1540 (375)	1600 (315)	0.92
28th day	1690 (425)	1733 (325)	0.84
Hospital discharge	1914 (194)	1850 (119)	0.10
Length			
7th day	41.0 (1.7)	39.5 (2.4)	0.10
14th day	41.0 (2.5)	40.0 (1.5)	0.50
21st day	41.8 (3.0)	41.5 (2.6)	0.71
28th day	42.0 (3.0)	42.1 (2.0)	0.59
Hospital discharge	43.0 (1.9)	43.0 (1.5)	0.51

IQR, interquartile range; REE, resting energy expenditure; cm, centimeters.

Abbildung 23: Postnataler Energieumsatzverlauf inkl. Körpergewicht und -größe (Abranches et al., 2018)

2019 führte **Beckmann** über 40 Einzelmessung zur Energieumsatzbestimmung durch. Als Messmethode wurde sowohl die indirekte Kalorimetrie als auch ein Kalkulationsprogramm verwendet. Hierbei zeigte sich, dass der Energieumsatz bei beiden Methoden am 10. Lebenstag bei ca. 51 kcal/(kg*d) lag. Am 20. Lebenstag konnte mittels indirekter Kalorimetrie ein Wert von 62 kcal/(kg*d) erhoben werden. Dieser korreliert sehr gut mit vorangegangenen Studien. Das Kalkulationsprogramm liefert einen deutlich niedrigeren Wert von ca. 55 kcal/(kg*d).

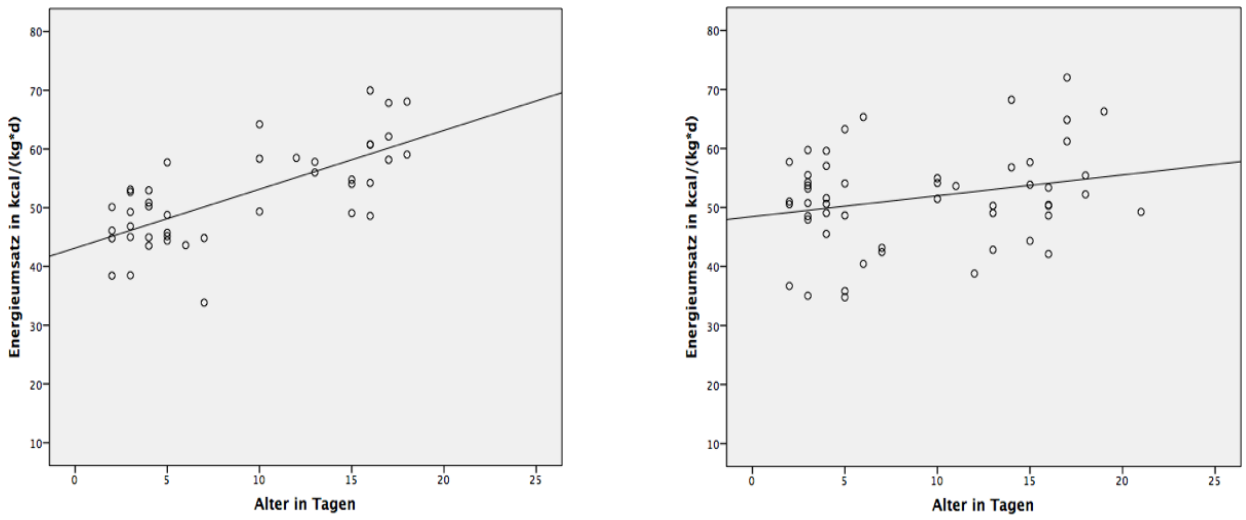


Abbildung 24: Energieumsatzanstieg (links: indirekte Kalorimetrie und rechts Kalkulationsprogramm) (Beckmann, 2019)

Zusammenfassend zeigt der Literaturvergleich, dass die Studienergebnisse dieser Arbeit sehr gut mit den Ergebnissen älterer Arbeiten übereinstimmen. Es konnte ein ähnlicher Energieumsatzanstieg über die ersten drei Lebenswochen dargestellt werden und somit ordnen sich die Ergebnisse regelrecht in den Literaturvergleich ein.

Um die Daten direkt in Zusammenhang zu bringen wurden die oben beschriebene Literaturergebnisse für den 10. und 20. Lebenstag analysiert und mit den Studienergebnissen verglichen. Das Ergebnis ist Tabelle 13 zu entnehmen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Werte teilweise direkt aus den Abbildungen entnommen wurden und somit keinen Absolutwerten entsprechen.

Tabelle 13: Literaturvergleich Energieumsatz

Studie	**Messmethode**	**Lebenstag 10** **Kcal/(kg*d)**	**Lebenstag 20** **Kcal/(kg*d)**
Chessex et al., 1981	Indirekte Kalorimetrie	58	64
DeMarie et al., 1999	Indirekte Kalorimetrie	53	66
Bauer, K. et al., 2003b	Indirekte Kalorimetrie	42	**53***
Abranches et al., 2018	Indirekte Kalorimetrie	**44,1*** (AGA) **46,7***(SGA)	**54,3*** (AGA) **53,7***(SGA)
Beckmann, 2019	Indirekte Kalorimetrie	52	62
Beckmann, 2019	Kalkulationsprogramm	51	55
Lommetz, 2025	Algorithmus	48	55

*Datenerhebung erfolgte am 7. bzw. 21. Lebenstag

5.4 Schlussfolgerung

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass es mit Hilfe des untersuchten Rechenalgorithmus möglich ist, den Energieumsatz von inkubatorversorgten Frühgeborenen annäherungsweise zu bestimmen. Zudem konnte der, aus der Literatur bekannte, signifikante postnatale Energieumsatzanstieg bestätigt werden.

Diese wichtigen Beobachtungen zeigen, dass der verwendete Rechenalgorithmus einen wichtigen Schritt in Richtung eines kontaktlosen Monitorings inklusive einer Möglichkeit zur Bestimmung des Energieumsatzes darstellt. Die Kenntnis des individuellen Energieumsatzes von Frühgeborenen kann dazu dienen eine individuelle Ernährungstherapie durchzuführen und die Einstellung der Inkubatorparameter (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) zu optimieren. Dies dient letztlich dem Ziel das Wachstum und die Entwicklung von Frühgeboren individuell zu fördern, da so eine Verbesserung des Outcomes möglich erscheint. Hierfür sind in Zukunft weitere Studien notwendig. Diese sollten unter anderem überprüfen, ob eine kontinuierliche Energieumsatzbestimmung bei Frühgeborenen wie gehofft auch zu einer Verbesserung des Outcomes führt. Außerdem müsste überprüft werden, inwiefern eine tägliche, individuelle Energieumsatzbestimmung in den klinischen Alltag zu integrieren ist.

Neben dem verwendeten Rechenalgorithmus wurde in dieser Arbeit der Energieumsatz zusätzlich auch mittels Wärmeflussmessungen bestimmt. Hierbei konnte eine deutlich größere Streuung der Ergebnisse verglichen mit den Ergebnissen des Rechenalgorithmus beobachtet werden. Des Weiteren werden mittels Wärmeflussmessung lediglich die trockenen Wärmeverluste berücksichtigt, was im Vergleich mit den Werten in der Literatur (indirekte Kalorimetrie) zu geringeren Energieumsätzen führt. Sollte die Wärmeflussmessung in Zukunft weiterverwendet werden, müsste ein Weg gefunden werden um die evaporativen Wärmeverluste zu berücksichtigen.

6 Zusammenfassung

Hintergrund: Nach der Geburt kommt es zu einem endogenen, für die thermische Stabilität maßgeblichen Anstieg des Grundumsatzes, der sich bei reifen Neugeborenen innerhalb von Stunden, bei Frühgeborenen je nach Unreife innerhalb von Wochen abspielt. Obwohl er gerade bei sehr kleinen Frühgeborenen für ein individualisiertes Ernährungsregime von Bedeutung wäre, wird der Energieumsatz in der klinischen Routine – wegen des technischen Aufwandes der Kalorimetrie oder der Wärmeflussmessung – nicht erfasst. Eine alternative, rechnerische Möglichkeit zur Bestimmung des Energieumsatzes ergibt sich aus den Inkubatoreinstellungen, die zur Aufrechterhaltung der thermischen Stabilität erforderlich sind und somit indirekt den verzögerten Stoffwechselanstieg widerspiegeln.

Fragestellung: Ist es möglich, den postnatalen Energieumsatzanstieg von Frühgeborenen mittels eines auf den Inkubatoreinstellungen beruhenden Rechenalgorithmus zu erfassen?

Material und Methoden: Zur Beantwortung dieser Frage wurde der postnatale Energieumsatzverlauf bei insgesamt 40 Frühgeborenen mit einem Reifealter von 25+5 bis 33+0 Schwangerschaftswochen rechnerisch aus den jeweiligen Inkubatoreinstellungen bestimmt. In 19 Fällen wurden die Rechenwerte mit den zu zwei Zeitpunkten (10±2 und 20±5 Tage) durchgeführten Wärmeflussmessungen verglichen.

Ergebnisse: Die Ergebnisse des Rechenalgorithmus lassen einen signifikanten Anstieg des Energieumsatzes zwischen Messung 1 (47,77±4,651 kcal/(kg*d)) und Messung 2 (55,46±4,521 kcal/(kg*d); $p<0.05$) erkennen und entsprechen damit in der Tendenz den zugehörigen gewichteten Wärmeflussmessungen (Messung 1: 40,79±6,320 kcal/(kg*d); Messung 2: 46,76±6,102 kcal/(kg*d); $p<0,05$). Von den Absolutwerten liegen die berechneten Werte genau in den aus der Literatur bekannten Bereichen (d10: 48 [42-58] kcal/(kg*d)]; d20: 55 [53-66] kcal/(kg*d)).

Diskussion: Der Vergleich zwischen den berechneten und den gemessenen Energieumsatzraten belegt, dass der Rechenalgorithmus den postnatalen Anstieg des Energieumsatzes grundsätzlich zu erfassen vermag und sich zumindest für ein Trendmonitoring eignet. Mit einer geringeren Streuung der Ergebnisse und ca. 15% höheren Werten als in der Wärmeflussmessung zeigt der Rechenalgorithmus sogar eine bessere Übereinstimmung mit Referenzdaten aus der Literatur.

Schlussfolgerung: Der postnatale Energieumsatzanstieg von Frühgeborenen lässt sich sowohl tendenziell als auch absolut mittels eines auf den Inkubatoreinstellungen beruhenden Rechenalgorithmus erfassen. Die Relevanz z.B. für ein individualisiertes Ernährungsregime sollte nun in einer prospektiven Anwendungsstudie untersucht werden.

7 Summary

Background: After birth, an endogenous increase metabolic rate occurs, which is crucial for thermal stability. While this occurs within hours in term infants, it may take several weeks in preterm infants, depending on their degree of immaturity. Although measuring energy expenditure could be highly relevant for individualized nutritional regimens in very low birth weight infants, it is generally not assessed in clinical routine due to the technical complexity of calorimetry or heat flux measurements. As an alternative, a calculational method to determine energy expenditure could be based on the incubator settings that are required to maintain thermal stability and thus indirectly reflect the delayed metabolic increase.

Objective: Is it possible to capture the postnatal increase in energy expenditure in preterm infants using a calculational algorithm based on incubator settings?

Material and Methods: To answer this question, the postnatal energy expenditure course was calculated from the respective incubator settings in a total of 40 preterm infants with a gestational age of 25+5 to 33+0 weeks. In 19 cases, the calculated values were compared with heat flow measurements performed at two time points (10±2 and 20±5 days).

Results: The results of the calculational algorithm show a significant increase in energy expenditure between measurement 1 (47,77±4,651 kcal/(kg*d)) and measurement 2 (55,46±4,521 kcal/(kg*d); $p<0,05$) and thus reflect the same trend as the weighted heat flux measurements (measurement 1: 40,79±6,320 kcal/(kg*d); measurement 2: 46,76±6,102 kcal/(kg*d); $p<0,05$). In terms of absolute values, the calculated values fall precisely within the range known from the literature (d10: 48 [42-58] kcal/(kg*d)]; d20: 55 [53-66] kcal/(kg*d)).

Discussion: Comparison of calculated and measured energy expenditure rates confirms that the computational algorithm fundamentally captures the postnatal increase in metabolic rate, making it suitable, at least, for trend monitoring. Exhibiting less data scatter and values approximately 15% higher than heat flux measurements, the algorithm even shows better agreement with reference data from the literature.

Conclusion: The postnatal rise in energy expenditure in preterm infants can be determined, both in trend and absolute terms, using a computational algorithm based on incubator settings. The clinical relevance, e.g., for individualized nutritional regimens, should now be investigated in a prospective application study.

8 Literaturverzeichnis

ABRANCHES, A. D., SOARES, F. V. M., VILLELA, L. D., MEIO, M., ZIN, O. A., GOMES JUNIOR, S. C. & MOREIRA, M. E. L. 2018. Energy expenditure, growth, and nutritional therapy in appropriate and small for gestational age preterm infants. *J Pediatr (Rio J),* 94**,** 652-657.

AMMARI, A., SCHULZE, K. F., OHIRA-KIST, K., KASHYAP, S., FIFER, W. P., MYERS, M. M. & SAHNI, R. 2009. Effects of body position on thermal, cardiorespiratory and metabolic activity in low birth weight infants. *Early Human Development,* 85**,** 497-501.

BAUER, J., HENTSCHEL, R. & LINDERKAMP, O. 2002. Effect of sepsis syndrome on neonatal oxygen consumption and energy expenditure. *Pediatrics,* 110**,** e69.

BAUER, J., MAIER, K., HELLSTERN, G. & LINDERKAMP, O. 2003a. Longitudinal evaluation of energy expenditure in preterm infants with birth weight less than 1000 g. *British Journal of Nutrition,* 89**,** 533-537.

BAUER, J., WERNER, C. & GERSS, J. 2009. Metabolic rate analysis of healthy preterm and full-term infants during the first weeks of life. *American Journal of Clinical Nutrition,* 90**,** 1517-1524.

BAUER, K., KETTELER, J., LAURENZ, M. & VERSMOLD, H. 2001. In vitro validation and clinical testing of an indirect calorimetry system for ventilated preterm infants that is unaffected by endotracheal tube leaks and can be used during nasal continuous positive airway pressure. *Pediatr Res,* 49**,** 394-401.

BAUER, K., LAURENZ, M., KETTELER, J. & VERSMOLD, H. 2003b. Longitudinal study of energy expenditure in preterm neonates <30 weeks' gestation during the first three postnatal weeks. *J Pediatr,* 142**,** 390-6.

BECKMANN, A. K. 2019. *Stoffwechselmonitoring bei Frühgeborenen : Vergleich von indirekter Kalorimetrie, Wärmeflussmessung und Rechenalgorithmen.* Staats- und Universitätsbibliothek Hamburg.

BELL, E. F. 1983. Infant incubators and radiant warmers. *Early Hum Dev,* 8**,** 351-75.

BELL, E. F., JOHNSON, K. J. & DOVE, E. L. 2017. Effect of Body Position on Energy Expenditure of Preterm Infants as Determined by Simultaneous Direct and Indirect Calorimetry. *Am J Perinatol,* 34**,** 493-498.

BIESALSKI, H.-K. & ADOLPH, M. 2010. *Ernährungsmedizin nach dem neuen Curriculum Ernährungsmedizin der Bundesärztekammer ; 276 Tabellen*, Thieme.

BRUCK, K., BRUCK, M. & LEMTIS, H. 1957. HAUTDURCHBLUTUNG UND THERMOREGULATION BEI NEUGEBORENEN KINDERN. *Pflugers Archiv Fur Die Gesamte Physiologie Des Menschen Und Der Tiere,* 265**,** 55-65.

CALCAGNO, M., KAHLEOVA, H., ALWARITH, J., BURGESS, N. N., FLORES, R. A., BUSTA, M. L. & BARNARD, N. D. 2019. The Thermic Effect of Food: A Review. *J Am Coll Nutr,* 38**,** 547-551.

CHESSEX, P., REICHMAN, B. L., VERELLEN, G. J. E., PUTET, G., SMITH, J. M., HEIM, T. & SWYER, P. R. 1981. INFLUENCE OF POSTNATAL AGE, ENERGY-INTAKE, AND WEIGHT-GAIN ON ENERGY-METABOLISM IN THE VERY LOW-BIRTH-WEIGHT INFANT. *Journal of Pediatrics,* 99**,** 761-766.

ÇINAR, N. D. & FILIZ, T. M. 2006. Neonatal thermoregulation. *Journal of Neonatal Nursing,* 12**,** 69-74.

DANIEL, H. & WENZEL, U. 2014. Energiebilanz und Ernährungszustand. *In:* HEINRICH, P. C., MÜLLER, M. & GRAEVE, L. (eds.) *Löffler/Petrides Biochemie und Pathobiochemie.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

DEMARIE, M. P., HOFFENBERG, A., BIGGERSTAFF, S. L. B., JEFFERS, B. W., HAY, W. W. & THUREEN, P. J. 1999. Determinants of energy expenditure in ventilated preterm infants. *Journal of Perinatal Medicine,* 27**,** 465-472.

ELABBASSI, E. B., BEIGHAZI, K., DELANAUD, S. & LIBERT, J. P. 2004. Dry heat loss in incubator: comparison of two premature newborn sized manikins. *European Journal of Applied Physiology,* 92**,** 679-682.

FREYMOND, D., SCHUTZ, Y., DECOMBAZ, J., MICHELI, J. L. & JEQUIER, E. 1986. ENERGY-BALANCE, PHYSICAL-ACTIVITY, AND THERMOGENIC EFFECT OF FEEDING IN PREMATURE-INFANTS. *Pediatric Research,* 20**,** 638-645.

GEKLE, M. 2018. Energiehaushalt und Kontrolle des Körpergewichts. *In:* PAPE, H.-C., KURTZ, A. & SILBERNAGL, S. (eds.) *Physiologie.* 8., unveränderte Auflage ed.: Georg Thieme Verlag.

GEKLE, M. 2019. Energieumsatz. *In:* PAPE, H.-C., KURTZ, A. & SILBERNAGL, S. (eds.) *Physiologie.* 9., vollständig überarbeitete Auflage ed.: Georg Thieme Verlag KG.

GRISSMER, S. 2012. Energie- und Wärmehaushalt. *In:* BEHRENDS, J. C., BISCHOFBERGER, J., DEUTZMANN, R., EHMKE, H., FRINGS, S., GRISSMER, S., HOTH, M., KURTZ, A., LEIPZIGER, J., MÜLLER, F., PEDAIN, C., RETTIG, J., WAGNER, C. & WISCHMEYER, E. (eds.) *Duale Reihe Physiologie.* 2 ed. Stuttgart: Thieme

HAMMARLUND, K. & SEDIN, G. 1979. Transepidermal water loss in newborn infants. III. Relation to gestational age. *Acta Paediatr Scand,* 68**,** 795-801.

HARRIS, J. A. & BENEDICT, F. G. 1918. A Biometric Study of Human Basal Metabolism. *Proc Natl Acad Sci U S A,* 4**,** 370-3.

HAUGEN, H. A., CHAN, L. N. & LI, F. 2007. Indirect calorimetry: a practical guide for clinicians. *Nutr Clin Pract,* 22**,** 377-88.

HAY, W. W., JR., BROWN, L. D. & DENNE, S. C. 2014. Energy Requirements, Protein-Energy Metabolism and Balance, and Carbohydrates in Preterm Infants. *In:* KOLETZKO, B., POINDEXTER, B. & UAUY, R. (eds.) *Nutritional Care of Preterm Infants: Scientific Basis and Practical Guidelines.*

HERING, J. 2009. *Der postnatale Energieumsatzanstieg Frühgeborener: Biologische Konstante oder alimentäre Variable?*

The postnatal increase of energy expenditure in premature infants: based on biological principles or alimentary variabilities?

HETTIARATCHY, S. & PAPINI, R. 2004. Initial management of a major burn: II--assessment and resuscitation. *Bmj,* 329**,** 101-3.

HEUBERGER, M. & FELS, H. 2007. Wärmelehre. *In:* SCHATZ, J. & TAMMER, R. (eds.) *Erste Hilfe — Physik und Chemie für Mediziner.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

HILL, J. R. & RAHIMTULLA, K. A. 1965. Heat balance and the metabolic rate of new-born babies in relation to environmental temperature; and the effect of age and of weight on basal metabolic rate. *J Physiol,* 180**,** 239-65.

HULZEBOS, C. V. & SAUER, P. J. 2007. Energy requirements. *Semin Fetal Neonatal Med,* 12**,** 2-10.

KAMMERER, T. 2001. Betreuung von Frühgeborenen. *intensiv,* 9**,** 42-57.

KARAMANOU, M., TSOUCALAS, G. & ANDROUTSOS, G. 2013. Hallmarks in the study of respiratory physiology and the crucial role of Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794). *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol,* 305**,** L591-4.

KIMBERGER, O., THELL, R., SCHUH, M., KOCH, J., SESSLER, D. I. & KURZ, A. 2009. Accuracy and precision of a novel non-invasive core thermometer. *Br J Anaesth,* 103**,** 226-31.

KOCH, J. 2010. Dräger Double Sensor - disposable core temperature sensor for clinical study - UKE Hamburg, Investigator brochure. *In:* AG&CO.KGA, D. (ed.).

KOCH, J. 2017. *Offenlegungsschrift*. Deutschland patent application.

KRÄMER, T., BÖHLER, T., JANECKE, A. R., HOFFMANN, G. F. & LINDERKAMP, O. 1999. Anwendung der indirekten Kalorimetrie zur Ernährungssteuerung bei kleinen Frühgeborenen. *Klinische Pädiatrie***,** 211(5): 389-393.

KRAUT, H., KOFRÁNYI, E., MOHR, E. & WIRTHS, W. 1981. Spezifisch-dynamische Wirkung (SDW). *In:* KRAUT, H., KOFRÁNYI, E., MOHR, E. & WIRTHS, W. (eds.) *Der Nahrungsbedarf des Menschen: Stoffwechsel, Ernährung und Nahrungsbedarf Energiebedarf Proteinbedarf.* Heidelberg: Steinkopff.

KREYMANN, K. G. 2003. Energieumsatz und Energiehaushalt. *In:* STEIN, J. & JAUCH, K. W. (eds.) *Praxishandbuch klinische Ernährung und Infusionstherapie.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

KREYMANN, K. G. 2018. 3 Energiehaushalt. *Ernährungsmedizin.* 5., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.

LEHNINGER, A. L., NEUBERT, D. & HUCHO, F. 2011. *Grundkurs Biochemie*, De Gruyter.

LIVESEY, G. 1987. Energy and protein requirements the 1985 report of the 1981 Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation. *Nutrition Bulletin,* 12**,** 138-149.

LUBETZKY, R., VAISMAN, N., MIMOUNI, F. B. & DOLLBERG, S. 2003. Energy expenditure in human milk- versus formula-fed preterm infants. *J Pediatr,* 143**,** 750-3.

LYON, A. J. & OXLEY, C. 2001. HeatBalance, a computer program to determine optimum incubator air temperature and humidity. A comparison against nurse settings for infants less than 29 weeks gestation. *Early Human Development,* 62**,** 33-41.

LYON, A. J., PIKAAR, M. E., BADGER, P. & MCINTOSH, N. 1997. Temperature control in very low birthweight infants during first five days of life. *Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed,* 76**,** F47-50.

MATARESE, L. E. 1997. Indirect calorimetry: technical aspects. *J Am Diet Assoc,* 97**,** S154-60.

MORTON, S. U. & BRODSKY, D. 2016. Fetal Physiology and the Transition to Extrauterine Life. *Clinics in Perinatology,* 43**,** 395-407.

MOSTELLER, R. D. 1987. SIMPLIFIED CALCULATION OF BODY-SURFACE AREA. *New England Journal of Medicine,* 317**,** 1098-1098.

MÜLLER, M. J., BOSY-WESTPHAL, A., KLAUS, S., KREYMANN, G., LÜHRMANN, P. M., NEUHÄUSER-BERTHOLD, M., NOACK, R., PIRKE, K. M., PLATTE, P., SELBERG, O. & STEININGER, J. 2005. Neue Referenzwerte für den Energieverbrauch - eine aktuelle Datenbank für den Ruheenergieverbrauch der deutschen Bevölkerung. *Aktuelle Ernährungsmedizin,* 30**,** 63-68.

MÜLLER, M. J., WESTENHÖFER, J., BOSY-WESTPHAL, A., LÖSER, C. & SELBERG, O. 2007. Ernährungsmedizinische Untersuchungen. *In:* MÜLLER, M. J. (ed.) *Ernährungsmedizinische Praxis: Methoden — Prävention — Behandlung.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

NATIONS, F. A. O. U., UNIVERSITY, U. N. & ORGANIZATION, W. H. 2004. *Human Energy Requirements: Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation : Rome, 17-24 October 2001*, Food and Agricultural Organization of the United Nations.

PATTON, A. R. 1962. The fire of life: An introduction to animal energetics (Kleiber, Max). *Journal of Chemical Education,* 39**,** A608.

PERSSON, P. 2019. Energie- und Wärmehaushalt, Thermoregulation. *In:* BRANDES, R., LANG, F. & SCHMIDT, R. F. (eds.) *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

PERSSON, P. B. 2007. Energie- und Wärmehaushalt, Thermoregulation. *In:* SCHMIDT, R. F. & LANG, F. (eds.) *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

PERZLMAIER, K. 1999. *Energieumsatz-Monitoring bei Neugeborenen durch Wärmeflußmessung an der Körperoberfläche.*

PLATT, M. W. & DESHPANDE, S. Metabolic adaptation at birth. Seminars in Fetal and neonatal Medicine, 2005. Elsevier, 341-350.

REICHMAN, B. L., CHESSEX, P., PUTET, G., VERELLEN, G. J., SMITH, J. M., HEIM, T. & SWYER, P. R. 1982. Partition of energy metabolism and energy cost of growth in the very low-birth-weight infant. *Pediatrics,* 69**,** 446-51.

RUTTER, N. 2000. Clinical consequences of an immature barrier. *Semin Neonatol,* 5**,** 281-7.

SAUER, P. J., DANE, H. J. & VISSER, H. K. 1984a. Longitudinal studies on metabolic rate, heat loss, and energy cost of growth in low birth weight infants. *Pediatr Res,* 18**,** 254-9.

SAUER, P. J., DANE, H. J. & VISSER, H. K. 1984b. New standards for neutral thermal environment of healthy very low birthweight infants in week one of life. *Archives of disease in childhood,* 59**,** 18-22.

SCHULZE, K., KAIRAM, R., STEFANSKI, M., SCIACCA, R., BATEMAN, D., DELL, R. & JAMES, L. S. 1981. Spontaneous variability in minute ventilation oxygen consumption and heart rate of low birth weight infants. *Pediatr Res,* 15**,** 1111-6.

SEDIN, G. & AGREN, J. 2006. Water and heat--the priority for the newborn infant. *Ups J Med Sci,* 111**,** 45-59.

SINGER, D. 2002. Phylogenese des Stoffwechsels der Säugetiere. *AINS-Anästhesiologie· Intensivmedizin· Notfallmedizin· Schmerztherapie,* 37**,** 441-460.

TIEMANN, J. 2019. 6.2 Ganzkörper-Kalorimetrie am menschlichen Organismus. *In:* KAUL, A. & DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR MEDIZINISCHE PHYSIK, C. (eds.) *Medizinische Physik in Forschung und Praxis.* Berlin, Boston: De Gruyter.

TORINE, I. J., DENNE, S. C., WRIGHT-COLTART, S. & LEITCH, C. 2007. Effect of Late-Onset Sepsis on Energy Expenditure in Extremely Premature Infants. *Pediatric Research,* 61**,** 600-603.

TUFFNELL, C. S., PETERSEN, S. A. & WAILOO, M. P. 1995. Prone sleeping infants have a reduced ability to lose heat. *Early Hum Dev,* 43**,** 109-16.

WASNER, J. 1994. Wärmebilanz bei Frühgeborenen. *In:* DRÄGERWERKE AG, L. (ed.).

WEIR, J. B. 1949. New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol,* 109**,** 1-9.

9 Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°C	Grad Celcius
∆T	Temperaturdifferenz
A	Körperoberfläche nach Mosteller
AGA	appropriate for gestational age, eutroph
AMV	Atemminutenvolumen
BMR	Basal Metabolic Rate, Grundumsatz
BW	Body Weight, Körpergewicht
cal	Kalorie
cm	Zentimeter
CPAP	continuous positive airway pressure
d	Tag
deltaX	Differenz des absoluten Wassergehaltes zwischen der ein- und ausgeatmeten Luft
EE_{DS}	Energieumsatz des Doppelsensors
EE_{RA}	Energieumsatz des Rechenalgorithmus
EE_{reg}	berechneter lokaler Energieumsatz
FAO	Food and Agriculture Organization
FL	Luftgeschwindigkeit im Inkubator (gerätespezifischer Parameter)
g	Gramm
GU	Grundumsatz
h	Stunde
IE	international Einheit
ILW	insensible water loss, unbeeinflussbare Wasserverluste über die Haut und die Lunge
J	Joule
K	Kelvin

k1-k10	Konstanten
kcal	Kilokalorie
Kg	Kilogramm
K_g	Wärmeübergangskoeffizienten (Gewebe)
K_s	Wärmeübergangskoeffizienten (Sensor)
m^2	Quadratmeter
Max	Maximum, Maxima
mdn	Median
Min	Minimum, Minima
min	Minuten
MJ	Megajoule
n	Stichprobengröße
NIPPV	noninvasive positive pressure ventilation
NTC	Negative Temperature Coefficient
O_2	Sauerstoff
Q_1	Wärmefluss im Gewebe
Q_2	regionaler Wärmefluss (im Sensor)
Q_{Evap}	Evaporation
Q_{Kon}	Konvektion
Q_{Rad}	Radiation
Q_{RWL}	Respiratorischer Wärmeverlust
R^2	Determinationskoeffizient
REE	Ruheenergieumsatz
RH	relative Feuchte
SGA	small for gestational age
SD	Standardabweichung
SI	internationals Einheitensystem

TD	Temperatur der Decke des Inkubators
Th_1	Temperatursensor (Haut)
Th_2	Temperatursensor (Umgebung)
TS	Temperatur der Seitenwand des Inkubators
VCO_2	Kohlendioxidproduktion, Kohlendioxidabgabe
VO_2	Sauerstoffverbrauch
W	Watt
WHO	Weltgesundheitsorganisation
$\overline{x}$	Mittelwert

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: „Maus-Elefant-Kurve“ (Singer, 2002) 7

Abbildung 2: Ontogenese des Stoffwechsels (Singer, 2002) 8

Abbildung 3: Indirekte Kalorimetrie (Müller et al., 2007) 12

Abbildung 4: Mechanismen des Wärmeverlustes beim Früh- bzw. Neugeborenen (Kammerer, 2001) 16

Abbildung 5: Schematischer Aufbau Doppelsensor (Kimberger et al., 2009) 21

Abbildung 6: Doppelsensor (Beckmann, 2019) 22

Abbildung 7: Wärmeflussmessung ohne Fixierung (CPAP-Mütze) (Beckmann, 2019) 23

Abbildung 8: Wärmeverluste beim Neugeborenen (Çınar and Filiz, 2006) 26

Abbildung 9: Ergebnisse Energieumsatz aller Wärmeflussmessungen 32

Abbildung 10: Mittelwerte der verschiedenen Wärmeverluste 34

Abbildung 11: Ergebnisse Energieumsatz Rechenalgorithmus, tägliche Berechnung an vorhandenen Datensätzen n=18 bis 40 35

Abbildung 12: Energieumsatz bestimmt durch Wärmeflussmessungen zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten (n=19; p<0.05) 40

Abbildung 13: Energieumsatz bestimmt durch den Rechenalgorithmus zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten (n=19; p<0.05) 41

Abbildung 14: Vergleich Energieumsatz durch zwei unterschiedliche Messmethoden (n=19; p<0.05) 42

Abbildung 15: Vergleich Inkubatortemperatur mit dem Energieumsatz durch die Wärmeflussmessungen (p=0.012) 44

Abbildung 16: Vergleich Inkubatortemperatur mit dem Energieumsatz durch den Rechenalgorithmus (p<0.001) 45

Abbildung 17: Vergleich Inkubatorfeuchtigkeit mit dem Energieumsatz durch Wärmeflussmessungen (p=0.795) 46

Abbildung 18: Vergleich Inkubatorfeuchtigkeit mit dem Energieumsatz durch den Rechenalgorithmus (p<0.001) 47

Abbildung 19: Energieumsatz über 40 Lebenstage (Chessex et al., 1981) 48

Abbildung 20: Energieumsatz, Nahrungszufuhr und Gewichtszunahme in den ersten Lebenswochen (Chessex et al., 1981) 48

Abbildung 21: Energieumsatzverlauf mit zunehmendem Alter (DeMarie et al., 1999) 49

Abbildung 22: Verlauf des Energieumsatzes über 22 Lebenstage (Bauer et al., 2003b) 49

Abbildung 23: Postnataler Energieumsatzverlauf inkl. Körpergewicht und -größe (Abranches et al., 2018) 50

Abbildung 24: Energieumsatzanstieg (links: indirekte Kalorimetrie und rechts Kalkulationsprogramm) (Beckmann, 2019) 51

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schätzformel Grundumsatz nach FAO/WHO (Nations et al., 2004) 15

Tabelle 2: Geschlechterverteilung und Mehrlingshäufigkeit 18

Tabelle 3: Körpermaße bei Geburt 18

Tabelle 4: Beobachtungszeitraum in Tagen 19

Tabelle 5: Aktivitätsgrade nach Brück 22

Tabelle 6: Studienkollektiv der 1. Wärmeflussmessung 30

Tabelle 7: Studienkollektiv der 2. Wärmeflussmessung 31

Tabelle 8: Ergebnisse der 1. Wärmeflussmessung 31

Tabelle 9: Ergebnisse der 2. Wärmeflussmessung 32

Tabelle 10: Deskriptive Statistik - Wärmeflussmessungen 33

Tabelle 11: Vergleich Messung 1 Wärmefluss und Rechenalgorithmus 43

Tabelle 12: Vergleich Messung 2 Wärmefluss und Rechenalgorithmus 43

Tabelle 13: Literaturvergleich Energieumsatz 52

Tabelle 14: ILW-Werte 72

Tabelle 15: Q_{Konv} 73

Tabelle 16: Q_{Rad} 74

Tabelle 17: Q_{Evap} 75

Tabelle 18: Q_{RWL} 76

Tabelle 19: Deskriptive Statistik - Rechenalgorithmus 77

12 Erklärung des Eigenanteils

Die grundlegende Idee für die Arbeit stammt von Herrn Prof. Dr. med. D Singer, der mir, nach Bekundung meines großen Interesses an dem Fachbereich der Neonatologie, das Thema überließ. Die genaue Fragestellung, das Studiendesign sowie das Studienprotokoll wurden zusammen mit ihm erarbeitet.

Die Auswahl an geeigneten Studienteilnehmern gelang in Zusammenarbeit mit den ärztlichen Kollegen der neonatologischen Intensivstation des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf. Die ausführliche Aufklärung der Erziehungsberechtigten erfolgte größtenteils durch mich und wurde durch das ärztliche Personal unterstützt. Die hierfür notwendigen Aufklärungs- und Einwilligungsbögen wurden mir von Herrn Professor Dr. med. D. Singer zur Verfügung gestellt.

Die Organisation der Datenerhebung ebenso wie deren Durchführung wurden von mir vorgenommen. Dabei konnte ich unter anderem auf die bereits vorliegende Patienten-dokumentation zurückgreifen.

Die Wärmeflussmessungen wurden ausschließlich von mir getätigt, ebenso die Auswertung und die anschließende Energieumsatzbestimmung.

Die Durchführung der Energieumsatzbestimmung durch den Rechenalgorithmus erfolgte zunächst durch mich. Bei der Analyse der Berechnungen wurde ich von Herrn Dr.-Ing. J. Koch unterstütz.

Die statistische Auswertung (deskriptive Analyse, Durchführung statistischer Test-verfahren), sowie die Erstellung der entsprechenden Abbildungen und Tabellen geschah eigenständig.

Die Interpretation der Ergebnisse, Erstellung der Diskussion und der Literaturvergleich entstand in Eigenleistung. Zusätzlich wurde dieser Prozess durch einen fachlichen Austausch mit Herrn Professor Dr. med. D. Singer und Herrn Dr.-Ing. J. Koch ergänzt.

Die Verfassung der Dissertation als Monographie erfolgte eigenständig. Die hierfür notwendige Literaturrecherche gelang überwiegend mittels PubMed®.

Lediglich die Korrektur der Arbeit in Hinblick auf Rechtschreibung und Grammatik erfolgte zusätzlich durch Dritte, die jedoch keinen Beitrag zum Inhalt der Arbeit leisteten.

13 Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe, insbesondere ohne entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- und Beratungsdiensten, verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe. Das gilt insbesondere auch für alle Informationen aus Internetquellen.

Soweit beim Verfassen der Dissertation KI-basierte Tools („Chatbots“) verwendet wurden, versichere ich ausdrücklich, den daraus generierten Anteil deutlich kenntlich gemacht zu haben. Die „Stellungnahme des Präsidiums der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) zum Einfluss generativer Modelle für die Text- und Bilderstellung auf die Wissenschaften und das Förderhandeln der DFG“ aus September 2023 wurde dabei beachtet.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

Datum Unterschrift

14 Danksagung

Die Erstellung dieser Dissertation war ein sehr langer Prozess, der ohne die Unterstützung einiger wichtiger Menschen nicht realisierbar gewesen wäre und denen ich an dieser Stelle danken möchte:

Zuallererst möchte ich mich bei meinem Doktorvater **Prof. Dr. med. Dominique Singer** für die Überlassung des spannenden Themas bedanken. Ihre Unterstützung während des gesamten Promotionsprozesses hat die Arbeit erst ermöglicht.

Ein besonderer Dank gilt den **Eltern der Frühgeborenen**, die mit ihrer Zustimmung zur Studienteilnahme und damit ihrem Vertrauen mir gegenüber, die Voraussetzung für die Erstellung dieser Arbeit geschaffen haben. Im Zuge dessen möchte ich mich auch bei dem gesamten **ärztlichen und pflegerischen Team der Stationen 5H und 5E** des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf für die organisatorische Unterstützung bei der Datenerhebung und Durchführung der Wärmeflussmessungen bedanken.

Insbesondere möchte ich mich auch bei **Dr.-Ing. Jochim Koch** für seine kontinuierliche Unterstützung während der Anfertigung dieser Arbeit bedanken. Der regelmäßige Austausch, deine spannenden Überlegungsansätze und deine konstruktiven Verbesserungsvorschläge haben einen entscheiden Beitrag zum Gelingen beigetragen.

Von ganzem Herzen danke ich meinem Ehemann **Dr. med. Christoph Lommetz**, der mir während der langen Promotionszeit immer zur Seite stand. Dein stetiger Zuspruch in Zeiten des Zweifelns sowie die Unterstützung während des langwierigen Schreibprozesses waren mir eine sehr große Stütze und haben maßgeblich dazu beigetragen, die Dissertation fertigzustellen.

Bei meinen Freundinnen **Dr. med. Sabrina Arnold** und **Janika Weber** möchte ich mich, neben dem Korrekturlesen, für deren tiefe Freundschaft bedanken.

Nicht zuletzt möchte ich **meinen Eltern** danken, die mir nicht nur mein Studium ermöglicht haben, sondern mir bis heute stets mit Rat und Tat zur Seite stehen.

15 Anhang

15.1 Dokumentation – Stammdaten

Studienteilnehmernummer:

Biographische Daten

Name, Vorname	
Geburtsdatum	
Geschlecht	
Gestationsalter	
Geburtsmodus	
APGAR	
Besonderheiten	

Geburtsmaße

Gewicht	
Körpergröße	
Kopfumgang	

15.2 Dokumentation – Wärmeflussmessung

Name:

Studienteilnehmernummer:

Datum/Uhrzeit:

Aktuelles Lebensalter und Gestationsalter:

Aktuelles Gewicht:

Aktuelle Körperlänge:

Inkubatoreinstellungen (Temperatur und Feuchtigkeit):

Zeitlicher Abstand zur Nahrungsaufnahme:

Zeit (min)	**Th_1 Stirn** (°C)	**Th_2 Stirn** (°C)	**Th_2 Wade** (°C)	**Th_2 Wade** (°C)	**Aktivitäts-zustand**
0					
5					
10					
15					
20					
25					
30					

15.3 Dokumentation - Rechenalgorithmus

Datum/Uhrzeit:

Alter/Gestationsalter:

Gewicht/Größe/Kopfumfang

Temperatur (rektal)

Beatmungsform

Anzahl der Mahlzeiten/Nahrungsform

Verabreichte Medikamente

Inkubatoreinstellungen: Feuchtigkeit, Temperatur

Bekleidungsart

Lage des Kindes

Aktivitätsgrad des Kindes

15.4 Unbeeinflussbare Wasserverluste über die Haut und die Lunge (ILW)

Tabelle 14: ILW-Werte

Gestational age (Weeks)	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**	**34**	**35**	**36**
Life age (Days)											
0	60	52	45	37	30	24	20	18	16	15	13
1	50	40	30	24	18	14	12	11	10	8	8
2	45	30	22	18	15	13	11	9	8	7	7
3	30	22	17	13	11	11	9	8	7	7	6
4	20	16	13	12	11	10	9	8	7	6	6
5	15	12	11	11	10	10	9	7	6	6	6
6	10	9	9	9	9	8	7	6	6	5	5
7	8	8	8	8	7	7	6	6	5	5	5
8	6	6	6	6	6	6	6	6	5	4	4
9	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4
10 bis 25	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

15.5 Wärmeverluste

Tabelle 15: Q_{Konv}

Tag	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
0	40	-0,211	0,628	0,088	0,224
1	40	-0,120	0,567	0,191	0,185
2	40	-0,138	0,651	0,172	0,192
3	40	-0,261	0,703	0,208	0,215
4	40	-0,150	0,662	0,225	0,202
5	40	-0,134	0,752	0,271	0,210
6	40	-0,106	0,963	0,332	0,245
7	40	0,095	0,946	0,411	0,216
8	40	0,007	0,866	0,458	0,188
9	40	0,162	0,923	0,491	0,195
10	40	0,008	1,067	0,515	0,219
11	40	-0,151	1,082	0,511	0,236
12	39	0,200	1,058	0,593	0,199
13	39	0,249	1,074	0,625	0,208
14	38	0,257	1,081	0,639	0,198
15	38	0,258	1,286	0,689	0,225
16	37	0,264	1,287	0,721	0,217
17	35	0,378	1,149	0,718	0,202
18	34	0,364	1,382	0,769	0,242
19	27	0,456	1,165	0,727	0,192
20	26	0,460	1,176	0,739	0,197
21	26	0,453	1,203	0,784	0,200
22	25	0,466	1,198	0,796	0,199
23	24	0,470	1,143	0,789	0,184
24	22	0,465	1,160	0,809	0,181
25	18	0,468	1,176	0,817	0,196

Tabelle 16: Q_{Rad}

Tag	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
0	40	0,633	2,265	1,375	0,431
1	40	0,844	2,379	1,536	0,410
2	40	0,654	2,558	1,483	0,433
3	40	0,751	2,658	1,525	0,471
4	40	0,853	2,505	1,552	0,445
5	40	0,785	2,703	1,643	0,473
6	40	0,736	2,944	1,758	0,539
7	40	1,057	3,025	1,903	0,508
8	40	0,921	2,831	2,000	0,473
9	40	1,183	3,177	2,074	0,482
10	40	1,139	3,204	2,127	0,504
11	40	0,854	3,248	2,140	0,527
12	39	1,236	3,256	2,277	0,486
13	39	1,347	3,284	2,351	0,506
14	38	1,407	3,306	2,386	0,489
15	38	1,413	3,625	2,477	0,517
16	37	1,459	3,648	2,552	0,513
17	35	1,651	3,534	2,558	0,484
18	34	1,786	3,791	2,652	0,544
19	27	1,805	3,582	2,549	0,480
20	26	1,842	3,616	2,574	0,471
21	26	1,808	3,702	2,674	0,485
22	25	1,862	3,685	2,702	0,476
23	24	1,875	3,517	2,691	0,425
24	22	1,855	3,549	2,734	0,430
25	18	1,867	3,617	2,761	0,473

Tabelle 17: Q_{Evap}

Tag	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
0	40	0,250	0,866	0,538	0,144
1	40	0,189	0,722	0,352	0,111
2	40	0,150	0,569	0,285	0,078
3	40	0,132	0,365	0,223	0,049
4	40	0,132	0,293	0,206	0,037
5	40	0,114	0,315	0,199	0,048
6	40	0,103	0,265	0,172	0,040
7	40	0,091	0,224	0,156	0,037
8	40	0,081	0,270	0,148	0,043
9	40	0,068	0,240	0,128	0,038
10	40	0,055	0,193	0,107	0,031
11	40	0,056	0,198	0,110	0,032
12	39	0,055	0,185	0,111	0,031
13	39	0,056	0,190	0,115	0,032
14	38	0,066	0,187	0,117	0,032
15	38	0,065	0,187	0,120	0,033
16	37	0,066	0,188	0,127	0,035
17	35	0,067	0,192	0,131	0,036
18	34	0,070	0,194	0,132	0,037
19	27	0,071	0,194	0,125	0,035
20	26	0,072	0,190	0,125	0,031
21	26	0,072	0,195	0,132	0,033
22	25	0,073	0,194	0,134	0,034
23	24	0,073	0,185	0,135	0,030
24	22	0,073	0,187	0,134	0,030
25	18	0,086	0,191	0,137	0,030

Tabelle 18: Q_{RWL}

Tag	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
0	40	0,092	0,438	0,272	0,091
1	40	0,123	0,456	0,284	0,089
2	40	0,114	0,447	0,272	0,089
3	40	0,111	0,460	0,270	0,087
4	40	0,124	0,475	0,270	0,086
5	40	0,119	0,485	0,284	0,093
6	40	0,116	0,482	0,302	0,100
7	40	0,140	0,546	0,321	0,105
8	40	0,149	0,620	0,345	0,111
9	40	0,168	0,667	0,362	0,113
10	40	0,170	0,676	0,376	0,114
11	40	0,152	0,690	0,388	0,119
12	39	0,176	0,655	0,398	0,115
13	39	0,185	0,687	0,414	0,120
14	38	0,225	0,664	0,419	0,115
15	38	0,230	0,667	0,433	0,119
16	37	0,230	0,680	0,457	0,121
17	35	0,239	0,686	0,467	0,125
18	34	0,252	0,695	0,477	0,127
19	27	0,257	0,705	0,455	0,119
20	26	0,275	0,719	0,463	0,111
21	26	0,269	0,753	0,489	0,118
22	25	0,273	0,746	0,494	0,118
23	24	0,278	0,696	0,501	0,101
24	22	0,280	0,709	0,504	0,105
25	18	0,308	0,737	0,507	0,105

Tabelle 19: Deskriptive Statistik - Rechenalgorithmus

Lebenstag	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
0	40	22,400	61,090	36,968	9,906
1	40	24,820	60,200	38,648	7,516
2	40	23,630	53,420	37,459	7,690
3	40	22,150	57,320	38,441	8,299
4	40	22,000	53,030	39,360	7,780
5	40	24,120	54,180	41,042	7,780
6	40	22,520	79,720	42,826	9,942
7	40	32,150	59,530	46,153	7,387
8	40	30,250	59,460	47,849	6,351
9	40	36,500	58,150	48,343	5,648
10	40	27,060	62,660	48,629	7,506
11	40	19,060	61,380	47,859	8,455
12	39	40,800	62,270	51,089	5,956
13	39	39,110	63,400	52,170	6,110
14	38	39,780	62,850	52,856	5,977
15	38	39,690	72,170	54,675	7,033
16	37	40,170	73,430	55,266	6,469
17	35	41,300	68,230	55,185	6,336
18	34	44,460	75,890	56,415	7,197
19	27	43,220	67,200	55,233	5,757
20	26	42,720	69,450	54,991	6,395
21	26	44,670	68,400	56,250	5,690
22	25	48,970	68,300	56,206	5,506
23	24	46,020	67,450	55,833	5,384
24	22	45,930	66,450	55,955	5,426
25	18	48,840	68,400	56,358	5,540