

Patientenwärmemanagement im OP – eine Betrachtung aus dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit

Zusammenfassung

Zum Thema Wärmemanagement von operativen Patient:innen liegen inzwischen eine Vielzahl von Studien, Metaanalysen und Publikationen, bis hin zur S3-Leitlinie „Vermeidung von perioperativer Hypothermie“ vor. Fast jegliche Form des Wärmemanagements, angefangen von der aktiven Wärzung des Patienten bis hin zur Klimatisierung eines Operationsbereiches, verbraucht Energie. Dabei stellen die aktive Kühlung der Raumluft im OP und die gleichzeitig aktive Erwärmung des Patienten Prozesse dar, die sich grundsätzlich gegenüberstehen. Dieser Aspekt, in sich selbst natürlich wiederum untrennbar mit dem Begriff der Nachhaltigkeit verbunden, wurde bisher allerdings kaum betrachtet.

In dieser Arbeit wurde deshalb der Energiebedarf von konvektiven und konduktiven Patientenwärmesystemen ermittelt und das damit verbundene CO₂-Äquivalent berechnet. Weiterhin wurde ein Szenario entwickelt, mit dem eine Abschätzung des Energiebedarfs der Klimatisierung des OP-Bereiches im Rahmen vernünftiger Annahmen ermöglicht wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein konvektives Verfahren zur aktiven Wärzung eines Patienten einen rund dreizehnfach höheren Energiebedarf aufweist im Vergleich zu einem konduktiven Verfahren. Hinsichtlich der Klimatisierung des OP-Bereichs liefern die Szenarien Hinweise darauf, dass hier bereits durch

Temperature management in the operating room – a view from the point of sustainability

S. Schiemann^{1,2} · J. Scheuber³ · P. Rockinger³ · J. Maier¹ · B. Drexler¹

► **Zitierweise:** Schiemann S, Scheuber J, Rockinger P, Maier J, Drexler B: Patientenwärmemanagement im OP – eine Betrachtung aus dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit. Anästh Intensivmed 2025;66:422–430. DOI: 10.19224/ai2025.422

relativ kleine Änderungen ganz erhebliche Energiemengen eingespart werden könnten.

Mit den hier vorgestellten Daten möchten die Autor:innen anhand eines einfachen Beispiels einen Denkanstoß liefern, auch den Aspekt des Energiebedarfs und der Nachhaltigkeit beim anästhesiologischen Patientenwärmemanagement zu berücksichtigen. Ein kleiner Baustein auf dem Weg zum „Green Hospital“.

Summary

Numerous studies, meta-analyses and publications have addressed the topic of temperature management in surgical patients, including the S3 guideline “Prevention of Perioperative Hypothermia.” Almost every form of temperature management, from actively warming the patient to air conditioning an operating room, requires energy. Active cooling of the air in the operating room and simultaneously warming the patient are fundamentally opposing processes. This aspect is itself inextricably linked to the concept of sustainability, however as of now has hardly been considered. Therefore, in the present study the energy consumption of convective and conductive patient warming systems was determined and the associated CO₂ equivalent calculated. Furthermore, a scenario was developed that allows to estimate the energy consumption for air conditioning in the operating room to be made, based on reasonable assumptions.

¹ Universitätsklinik für Anästhesiologie und Intensivmedizin
Universitätsklinikum Tübingen
(Direktor: Prof. Dr. P. Rosenberger)

² AG Nachhaltigkeit
Universitätsklinik für Anästhesiologie und Intensivmedizin
Universitätsklinikum Tübingen
(Leiterin: S. Schiemann, Gesundheits- und Krankenpflegerin)

³ Medizinische Fakultät
Eberhard Karls Universität Tübingen
(Dekan: Prof. Dr. rer. nat. B. Pichler)

Interessenkonflikt

Die Autorinnen und Autoren geben an, dass keine Interessenkonflikte bestehen.

Schlüsselwörter

Patientenwärmemanagement – Nachhaltigkeit – Raumklimatisierung – Energiebedarf

Keywords

Patient temperature management – Sustainability – Heating, ventilation and air conditioning of the operating room – Power consumption

The results show that a convective method for actively warming a patient consumes about thirteen times more energy than a conductive method. With regard to air conditioning in the operating room, the scenarios indicate that relatively small changes could result in significant energy savings. Hereby, the authors would like to provide a thought-provoking impulse on the importance of considering energy consumption and sustainability in anaesthesiological patient temperature management, a small step towards becoming a "Green hospital."

Einleitung

Das prä-, intra- und postoperative Wärmemanagement ist ein zentraler Aspekt der Patientensicherheit und -versorgung in der modernen operativen Medizin. Die Vermeidung einer unbeabsichtigten Hypothermie, definiert als eine Körperkerntemperatur unter 36 °C, ist nicht nur medizinisch notwendig, sondern hat auch weitreichende ökonomische und ökologische Implikationen [1]. Während die klinischen Vorteile eines effektiven Wärmemanagements, wie die Reduktion von postoperativen Komplikationen und Verkürzung der Krankenhausaufenthalte, bereits seit langer Zeit gut dokumentiert sind [2–6], rücken zunehmend auch Aspekte der Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit in den Fokus. Die Implementierung von Wärmemanagement-Strategien erfordert den Einsatz verschiedener Technologien und Verbrauchsmaterialien, die sowohl Kosten verursachen als auch Auswirkungen auf die Umwelt haben können [7,8]. Gleichzeitig bietet ein optimiertes Wärmemanagement das Potenzial für erhebliche Kosteneinsparungen durch ein verbessertes Patienten-Outcome und effizientere Nutzung von OP-Kapazitäten [8].

Diese Arbeit untersucht daher die Möglichkeiten zur ökologischen Optimierung des Wärmemanagements im OP. Dabei werden primär Ansätze zur Energieeinsparung analysiert. Dies mag sehr wohl auch zur Reduzierung von Abfall

und Verbesserung der Kosteneffizienz führen, was jedoch nicht im Zentrum dieser Arbeit steht. Ziel ist es, Strategien zu identifizieren, die den ökologischen Fußabdruck des OP-Betriebs reduzieren, ohne dabei Nachteile in der Patientenversorgung zu verursachen. Es sollen dabei zwei Aspekte des perioperativen Wärmemanagements genauer betrachtet werden: das direkte, patientenzentrierte Wärmemanagement und die Klimatisierung eines Operationsbereiches.

Aktives Wärmemanagement zur Vermeidung perioperativer Hypothermie

Die perioperative Hypothermie ist mit einer erhöhten Letalität, Wundinfektionen, Blutungen und kardialen Komplikationen assoziiert. Um diese zu vermeiden, sind folgende Maßnahmen empfohlen [1]:

- präoperative Temperaturmessung 1–2 Stunden vor OP-Beginn
- aktives Vorwärmen („Prewarming“) für 30–60 Minuten vor Narkoseeinleitung
- intraoperative kontinuierliche oder alle 15 Minuten intermittierende Temperaturmessung
- aktive Wärmemaßnahmen bei Operationen >30 Minuten Dauer
- Anwärmen von Infusionen und Blutprodukten

Durchführung und Dokumentation der Wärmemaßnahmen sind grundständige Aufgaben der Anästhesie. Für die aktiven Wärmemaßnahmen werden verschiedene Verfahren genutzt, welche hier mit besonderem Fokus auf die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen untersucht wurden:

- konvektive Verfahren: Wärmedecke mit Luftwärmung und Erwärmung von Infusionen und Blutprodukten
- konduktive Verfahren: Heizmatte

Nach der aktuellen S3-Leitlinie sollen diese Verfahren nicht alleinstehend, sondern in Kombination eingesetzt und durch ein aktives Prewarming ergänzt werden [1]. All diese Verfahren basieren primär auf der Erzeugung von Wärme durch elektrische Energie und involvieren mitunter auch den Einsatz

von Einwegmaterialien. Der damit einhergehende Energiebedarf und die Generierung von Abfällen tragen somit auch zur Erhöhung des ökologischen Fußabdrucks des Gesundheitssystems bei.

Raumluftklimatisierung im Operationsbereich

Die Regulierung der Raumtemperatur im Operationssaal erfordert die Berücksichtigung vieler, teils in Konflikt stehender Faktoren. Eine zentrale Bedeutung hat die Raumlufttemperatur bei der Vermeidung der perioperativen Hypothermie. Hierbei senkt eine Raumlufttemperatur von 21–24 °C signifikant das Risiko für die perioperative Hypothermie im Vergleich zu einer Raumtemperatur von 18–21°C [1].

Die thermische Behaglichkeit des OP-Personals (Zustand, in dem Mitarbeitende im OP mit der thermischen Umgebung zufrieden sind) stellt einen weiteren wichtigen Faktor dar. Unterschiede in Kleidung und Aktivitätsgrad führen im OP-Team zu teils widersprüchlichen Wärmebedürfnissen. Hierbei soll die Raumlufttemperatur insgesamt zu einem behaglichen Arbeitsumfeld für alle beitragen [9].

Es gilt daher, einen Kompromiss zwischen Patientensicherheit, Infektionsprävention und optimalen Arbeitsbedingungen zu finden. Um Konsistenz zu gewährleisten, wird empfohlen, die Temperaturregulierung zentral über die Haustechnik zu steuern [9].

Auch wenn die ersten Leitlinien und Empfehlungen zum Thema Nachhaltigkeit in der Anästhesiologie und Intensivmedizin die ökologischen Aspekte des Patientenwärmemanagements bzw. der Klimatisierung des OP-Bereichs inzwischen erwähnen [10,11] stehen wir bei dieser spezifischen Betrachtungsweise des Themas vermutlich erst am Anfang. Deshalb ist es Gegenstand der hier vorliegenden Arbeit, Basisdaten zu dieser Thematik zu präsentieren. Konkret soll dabei die Frage beantwortet werden, welches patientenseitige Wärmeverfahren welchen Energiebedarf aufweist und wie die aktive Kühlung

des Operationsbereichs (im Sommer) bei gleichzeitig aktiver Wärmung des Patienten energetisch und ökologisch zueinander im Verhältnis stehen.

Methoden

Zur Beantwortung der zuvor aufgeworfenen Fragen wurde die Leistungsaufnahme gängiger Patientenwärmesysteme im OP direkt gemessen und weiterhin eine Abschätzung des Energiebedarfs der Klimatisierung des OP-Bereichs, basierend auf verfügbaren Daten und rationalen Annahmen, vorgenommen.

Zur Erfassung des Energiebedarfs wurden folgende Geräte im Rahmen des operativen Alltags über einen digitalen Stromzähler (Voltcraft SEM 5000, Conrad Electronic, Hirschau, Abbildung 1) angeschlossen und die Leistungsaufnahme während den laufenden Operationen gemessen:

- als konvektive Verfahren
 - 1.) Ganzkörper-Wärmedecke mit Luftwärmung: 3M™ Bair Hugger™ und 2.) Wärmegerät von Infusionen und Blutprodukten: Stihler Electronic Astoflo® Plus Eco
- als konduktives Verfahren (Heizmatte): Stihler Electronic Astopad®

In die Analyse wurden ausschließlich Messungen eingeschlossen, die folgende Kriterien erfüllten:

- Patientenalter 18–65 Jahre
- Body-Mass-Index (BMI) von 18,5 bis 24,9
- präoperative Normothermie
- Operation unter Allgemeinanästhesie
- keine offene Operation des Thorax- und/oder des Abdominalraums

Zunächst erfolgte eine Leermessung (Wärmesystem ohne Patient:in), um die grundsätzliche Machbarkeit zu zeigen. Die Datenerfassung erfolgte dann im normalen OP-Betrieb an jeweils zwei bzw. drei zufällig ausgewählten chirurgischen Eingriffen mit einer geplanten OP-Dauer von mindestens 120 Minuten. Berichtet werden hier ausschließlich diese im OP-Routinebetrieb erhobenen Daten.

Abbildung 1



Digitaler Stromzähler SEM5000 im Versuchsaufbau.

Es wurden jeweils Zeiträume von 120 Minuten untersucht und diese in Blöcke von je 30 Minuten unterteilt. Zur grafischen Darstellung der Daten erfolgte eine Mittelung über die Zeit in MS® Excel® LTSC Version 2408 mithilfe der Funktion „gleitender Mittelwert“ über fünf Datenpunkte.

Um das aus dem gemessenen Energiebedarf resultierende CO₂-Äquivalent zu berechnen, wurden aktuelle Daten des Umweltbundesamtes verwendet, wonach eine Kilowattstunde Strom einem Äquivalent von 363 g CO₂ entspricht [12]. Um weiterhin eine Vergleichbarkeit der hier gewonnenen Daten mit den unten beschriebenen zu erleichtern, wurden der Stromverbrauch und das CO₂-Äquivalent pro Tag und pro Monat hochgerechnet. Dabei wurde eine durchschnittliche Schnitt-Naht-Zeit von 4 Stunden pro Tag und OP-Saal angenommen (Grundlage OP-Woche Mo–So) und daraus wiederum eine Patientenwärmezeit von 5 Stunden. Für die Ermittlung des Abfallgewichts wurden Herstellerangaben aus dem Katalog der aktuellen Produktreihe verwendet.

Da es sich bei der Untersuchung bestens um eine hypothesenbildende Studie handelt, wurde auf eine Fallzahlplanung verzichtet. Ferner erfolgte auch keine Beratung durch die Ethik-Kommission, da keine Patientendaten erhoben wurden.

Der Energiebedarf zur direkten Wärmung des Patienten kann also sehr konkret bestimmt werden. Deutlich schwieriger ist es allerdings, Daten zur Klimatisierung eines Operationsbereiches zu erhalten. Eine genaue Abschätzung ist nicht möglich; es kann lediglich eine grobe Annäherung auf Basis von mess- und betrieblichen Erfahrungswerten erfolgen, ergänzt durch thermodynamisch plausible Annahmen. Dennoch erscheint dieses Vorgehen gerechtfertigt, um eine Vorstellung der Dimension zu bekommen, in denen Einsparungen potenziell möglich wären.

Beispielhaft soll hier ein heißer Sommermonat betrachtet werden, bei einer Außentemperatur von 31 °C über einen Zeitraum von 30 Tagen. Der Energiebedarf für eine Abkühlung der Zuluft für den OP-Bereich auf 16 °C (tatsächliches, aktuelles Vorgehen in der Klinik der Autor:innen, um die gewünschte Zieltemperatur im OP zu erreichen) sowie auf 21 °C (postulierte Vorgehen) wurde wie folgt berechnet:

$$P = \dot{V} \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T$$

Hierbei ist P die Kühlleistung in Watt (W), \dot{V} der Volumenstrom der zu kühlenden Luft in m³/s, ρ die Dichte der Luft (rund 1,2 kg/m³), c die spezifische Wärmekapazität von Luft bei konstantem Druck (ca. 1005 J · kg⁻¹ · K⁻¹) und ΔT die angestrebte Temperaturänderung in Kelvin (K).

Ergebnisse

Aktives Wärmemanagement am Patienten

Konvektives Verfahren 1: Einmalwärmedecke mit Luftwärmung

Unmittelbar nach dem Start des Gerätes Bair Hugger™ stieg der Stromverbrauch zunächst stark an. Durch den im Gerät verbauten elektrischen Heizlüfter wird eine hohe dauerhafte Leistungsaufnahme verursacht. Sinkt die Temperatur am Temperaturfühler unter den eingestellten Wert, wird zusätzliche Energie für eine Steigerung der Heizleistung aufgenommen. Während der ersten 30 Minuten lag die durchschnittliche Leistungsaufnahme bei 448 W, während für die folgenden 90 Minuten ein Wert von 413 W ermittelt wurde. Der Stromverbrauch in den ersten 30 Minuten lag somit über dem Stromverbrauch der weiteren Nutzungszeit. Eine exemplarische Originalmessung ist in Abbildung 2 dargestellt, die gemittelten Daten sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1

Gemessene und berechnete Daten zum konvektiven Verfahren Bair Hugger™.

Zeitspanne	Leistungsaufnahme	Stromverbrauch	CO ₂ -Äquivalent
1–30 Minuten	448 W	0,224 kWh	81,3 g
31–60 Minuten	423 W	0,211 kWh	76,6 g
61–90 Minuten	413 W	0,206 kWh	74,8 g
91–120 Minuten	403 W	0,202 kWh	73,3 g
Ø pro Betriebsstunde		0,4215 kWh	153 g
Ø pro OP-Tag*		2,1075 kWh	765 g
Ø pro Monat**		63,225 kWh	22,95 kg

* Bei einer durchschnittlichen Schnitt-Naht-Zeit von 4 Stunden pro OP-Saal (Mo–So) wurde hier eine durchschnittliche Patientenwärmezeit von 5 Stunden pro Tag postuliert. ** Die Werte wurden für einen Monat à 30 Tage berechnet. Da die Messwerte innerhalb der 30-minütigen Intervalle eine recht hohe Homogenität aufwiesen, werden keine Streumaße angegeben.

Während der Nutzung des Gerätes wurde über den untersuchten Zeitraum von 120 Minuten durch den Stromverbrauch ein CO₂-Äquivalent von 306 g emittiert. Darüber hinaus erfordert dieses konvektive Verfahren den Einsatz von Einwegdecken aus Kunststoff. Das führt bei jeder Anwendung zu einer zusätzlichen Produktion von Abfällen, für die Ganzkörperdecke in einer Größenordnung von 150 g [13].

Konvektives Verfahren 2: Erwärmung von Infusionsflüssigkeiten

Das Gerät zur Erwärmung von Infusionslösung (Astoflo® Plus Eco) wies gegenüber ein anderes Verbrauchsmuster auf. Auch hier zeigte sich nach Start des Geräts initial ein hoher Verbrauch, jedoch war die Leistungsaufnahme im folgenden Zeitraum in hohem Maße abhängig von der eingestellten Flussrate

der zu erwärmenden Infusion. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme betrug in unserer Messreihe 31 W, wobei deutliche Schwankungen von Minima und Maxima zu beobachten waren, welche wir auf die unterschiedlichen Laufraten und Infusionsvolumina zurückführen. Eine exemplarische Originalmessung findet sich in Abbildung 3, die gemittelten Daten sind in Tabelle 2 wiedergegeben.

Es ist an dieser Stelle hervorzuheben, dass der Einsatz des untersuchten Gerätes ohne die Verwendung von (über das Infusionsbesteck hinausgehende) Einwegmaterialien erfolgt. Folglich entsteht keine zusätzliche Umweltbelastung durch die Generierung von Abfällen.

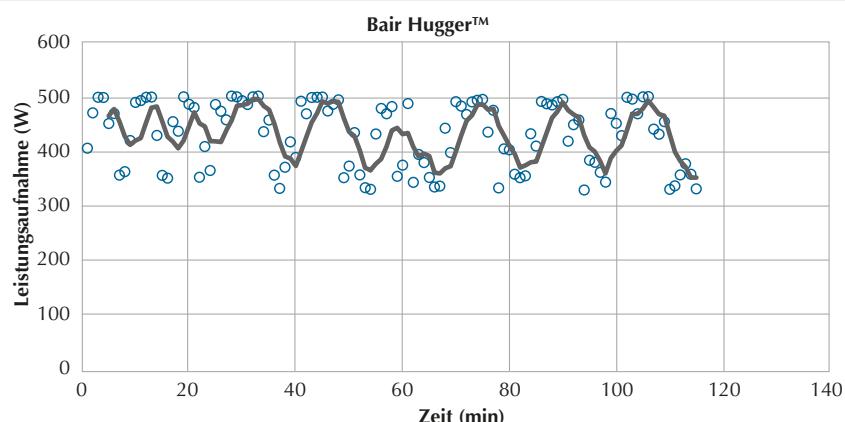
Konduktives Verfahren: Wiederverwendbare Wärmematte

Die analysierte Astopad®-Wärmematte wies ein ähnliches Verbrauchsmuster wie das konvektive Verfahren „Wärmedecke“ auf, jedoch bei einer deutlich geringeren Leistungsaufnahme. In der initialen Phase von 30 Minuten war der Stromverbrauch mit 39 W noch relativ hoch, bis das Gerät die voreingestellte Temperatur erreicht hatte. Im anschließenden Zeitraum scheint es nach unseren Messungen drei Betriebszustände zu geben: Stand-by, reduzierte Heizleistung und volle Heizleistung. Nach der Anfangsphase befindet sich das Gerät häufiger im Stand-by-Modus ohne aktive Heizleistung, was zu einer Reduzierung des Stromverbrauchs führt. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme sank während den darauffolgenden 90 Minuten auf 30 W. Im direkten Vergleich zum oben beschriebenen konvektiven Verfahren „Wärmedecke“ erweist sich der ermittelte Stromverbrauch somit als deutlich geringer. Eine exemplarische Originalmessung findet sich in Abbildung 4, die gemittelten Daten sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Auch dieses System kommt ohne Einwegmaterialien aus.

Raumluftklimatisierung im OP-Bereich

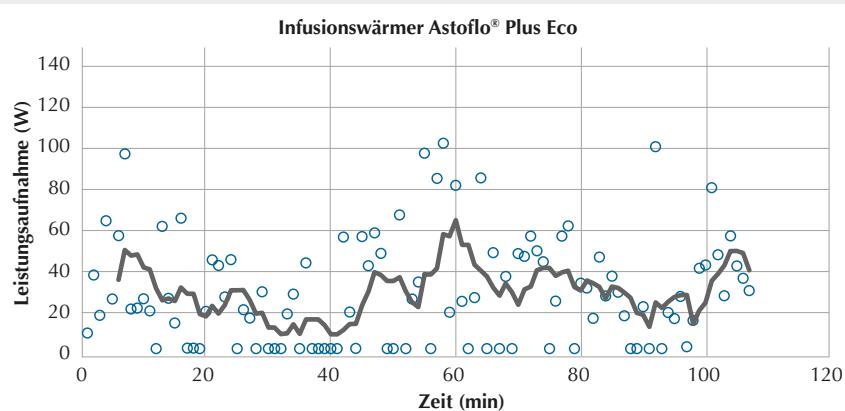
Im Allgemeinen ist die Klimatisierung einer Klinik technisch komplex und umfasst neben raumluftechnischen An-

Abbildung 2



Leistungsaufnahme 3M™ Bair Hugger™ in Watt pro Zeit. Dargestellt sind die einzelnen Messpunkte einer Aufzeichnung als Kreise sowie eine Mittelung über die Zeit als durchgezogene Linie.

Abbildung 3



Leistungsaufnahme Infusionswärmere Astoflo® Plus Eco in Watt pro Zeit. Dargestellt sind die einzelnen Messpunkte einer Aufzeichnung als Kreise sowie eine Mittelung über die Zeit als durchgezogene Linie.

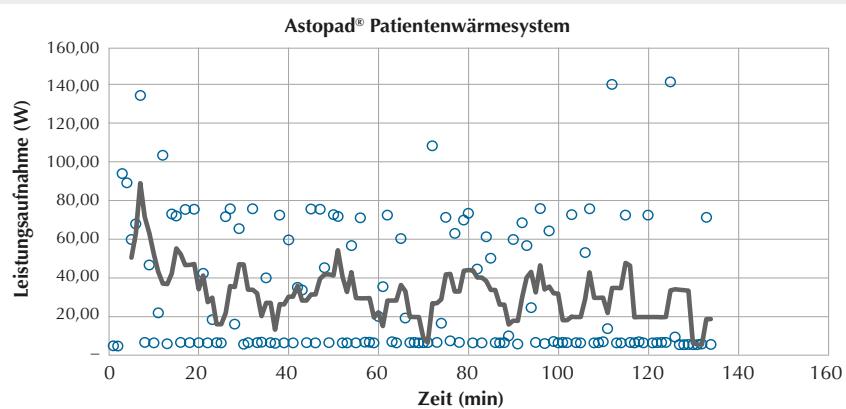
Tabelle 2

Gemessene und berechnete Daten des Infusionswärmers Astoflo® Plus Eco.

Zeitspanne	Leistungsaufnahme	Stromverbrauch	CO ₂ -Äquivalent
1–30 Minuten	27 W	0,014 kWh	5,1 g
31–60 Minuten	30 W	0,015 kWh	5,4 g
61–90 Minuten	32 W	0,016 kWh	5,8 g
91–120 Minuten	34 W	0,017 kWh	6,2 g
Ø pro Betriebsstunde		0,031 kWh	11,25 g
Ø pro OP-Tag*		0,155 kWh	56,25 g
Ø pro Monat**		4,65 kWh	1,6875 kg

* Bei einer durchschnittlichen Schnitt-Naht-Zeit von 4 Stunden pro OP-Saal (Mo–So) wurde hier eine durchschnittliche Patientenwärmzeit von 5 Stunden pro Tag postuliert. ** Die Werte wurden für einen Monat à 30 Tage berechnet. Da die Messwerte innerhalb der 30-minütigen Intervalle eine recht hohe Homogenität aufwiesen, werden keine Streumaße angegeben.

Abbildung 4



Leistungsaufnahme Wärmematte Astopad® in Watt pro Zeit.
Dargestellt sind die einzelnen Messpunkte einer Aufzeichnung als Kreise sowie eine Mittelung über die Zeit als durchgezogene Linie.

Tabelle 3

Gemessene und berechnete Daten zum konduktiven Verfahren Astopad®- Wärmematte.

Zeitspanne	Leistungsaufnahme	Stromverbrauch	CO ₂ -Äquivalent
1–30 Minuten	39 W	0,019 kWh	6,9 g
31–60 Minuten	35 W	0,017 kWh	6,2 g
61–90 Minuten	30 W	0,015 kWh	5,4 g
91–120 Minuten	26 W	0,013 kWh	4,7 g
Ø pro Betriebsstunde		0,032 kWh	11,6 g
Ø pro OP-Tag*		0,16 kWh	58 g
Ø pro Monat**		4,8 kWh	1,74 kg

* Bei einer durchschnittlichen Schnitt-Naht-Zeit von 4 Stunden pro OP-Saal (Mo–So) wurde hier eine durchschnittliche Patientenwärmzeit von 5 Stunden pro Tag postuliert. ** Die Werte wurden für einen Monat à 30 Tage berechnet. Da die Messwerte innerhalb der 30-minütigen Intervalle eine recht hohe Homogenität aufwiesen, werden keine Streumaße angegeben.

lagen auch Wärmetauscher sowie Kalt- und Warmwasserregister. An der Klinik der Autor:innen werden über mehrere Zulufttürme stündlich ca. 750.000 m³ Außenluft über leistungsstarke Ventilatoren in die Gebäudestruktur eingespeist (Abb. 5). Diese Luft durchläuft zunächst eine HEPA-Filtration, bevor sie zur Klimatisierung zur Verfügung steht.

Anschließend erfolgt durch Wärmetauscher eine Energierückgewinnung, abhängig von den Temperaturdifferenzen zwischen Außen- und Innenluft. Quantifizierbare Messdaten zur tatsächlich rückgewonnenen Energiemenge konnten im Rahmen der hier berichteten Untersuchung jedoch nicht gewonnen werden.

Nach der Luftansaugung und Wärmerückgewinnung wird die Zuluft grob in zwei Versorgungsbereiche aufgeteilt: „Klinik Allgemein“ und „OP-Bereich“. Dabei entfallen immerhin rund zehn Prozent der zugeführten Luftmenge auf den OP-Bereich (Abb. 6). Hierbei ist zu beachten, dass damit ausschließlich die eigentlichen OP-Säle gemeint sind; angrenzende Räume wie der Aufwachraum, die Personalumkleide oder Nebenbereiche werden über die allgemeine Zuluft versorgt (Abb. 6).

Die für die Klimatisierung des OP-Bereichs verwendete Luft wird zunächst befeuchtet. Die Temperaturregelung erfolgt anschließend messfühlergesteuert über Luftkühler, typischerweise im Be-

Abbildung 5



Zulufttürme des Klinikums.

reich von 16 bis 18 °C, um eine konstante Raumtemperatur im OP sicherzustellen. Abschließend wird die verbrauchte Luft über ein zentrales Abluftsystem mit Abluftschacht abgeführt.

Für die exemplarische Berechnung des Energiebedarfs wurden zwei verschiedene Szenarien entwickelt. Wir betrachten grundsätzlich einen heißen Sommermonat mit einer Außentemperatur von 31 °C.

Szenario 1: Die für den OP-Bereich benötigte Luftmenge wird auf 16 °C abgekühlt (aktueller Vorgehen, Temperaturdifferenz 15 K).

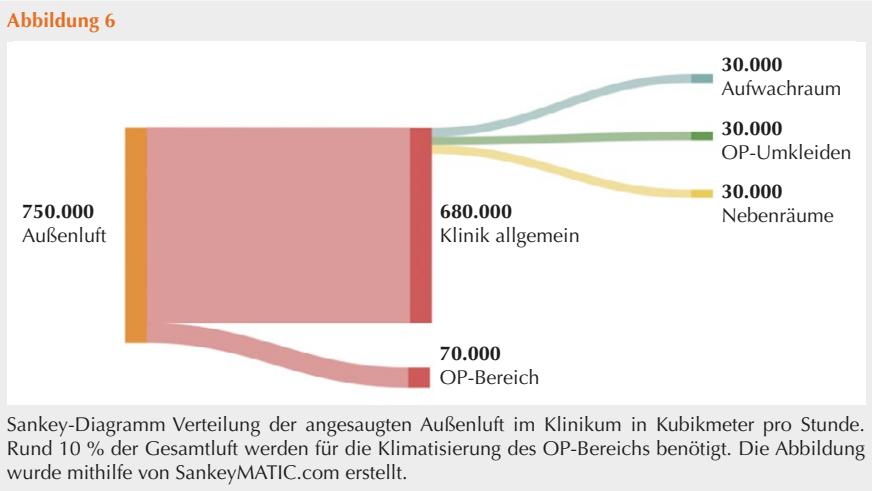
Szenario 2: Die für den OP-Bereich benötigte Luftmenge wird lediglich auf 21 °C abgekühlt (klimafreundliches, hypothetisches Vorgehen, Temperaturdifferenz 10 K).

Nach der oben genannten Formel ergeben sich bei einer Luftmenge von 70.000 m³/h, d. h. 19,44 m³/s, für den OP-Bereich im Szenario 1, Kühlung der Luft auf 16 °C, primär also:

$$P = 19,44 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 1005 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 15 \text{ K} = 351.669 \text{ W}$$

Für Szenario 2, Kühlung auf lediglich 21 °C, berechnet sich die Kälteleistung folglich als:

$$P = 19,44 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 1005 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 10 \text{ K} = 234.446 \text{ W}$$

Abbildung 6

Daraus ergibt sich primär eine Differenz von 117.223 W zwischen Szenario 1 und Szenario 2.

Detaillierte Informationen über die tatsächlichen technischen Daten der Großklimaanlage des Klinikums konnten im Rahmen der hier beschriebenen Studie leider nicht erhoben werden. Jedoch erscheint es vernünftig, für aktuell in Betrieb befindliche klassische Kompressionskältemaschinen eine Leistungszahl (Verhältnis von erzeugter Kälteleistung zur eingesetzten elektrischen Energie) von ca. 2,5 anzunehmen [14].

Somit ergibt sich eine tatsächliche Differenz zwischen den beiden Szenarien von 117 kW / 2,5 = 47 kW.

Um diese Differenz im Energiebedarf (Stromverbrauch) etwas zu veranschaulichen, wurde das Ergebnis in CO₂-Emissionen pro Tag und für einen Monat von 30 Tagen dargestellt. Hierbei wurde, basierend auf Angaben des Umweltbundesamts, ein Ausstoß von 0,363 kg CO₂ pro kWh zugrunde gelegt [12]. Die errechnete Energiedifferenz von 47 kW entspricht 1125 kWh pro 24 Stunden oder als CO₂-Äquivalent ausgedrückt:

$$1125 \text{ kWh} \cdot 0,363 \text{ kgCO}_2/\text{kWh} = 408,5 \text{ kg CO}_2 \text{ pro Tag bzw.}$$

$$12,25 \text{ t CO}_2 \text{ in 30 Tagen.}$$

Diskussion

Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der perioperativen Normothermie sind ein

Eckpfeiler der Homöostase und damit eine Kernaufgabe der Anästhesiologie [1]. Verschiedene Methoden der Patientenwärmung, z. B. konvektive und konduktive Verfahren, sind in ihrer Effektivität inzwischen gut untersucht [15,16]. Hinsichtlich ihrer Effizienz, vor allem im Hinblick auf energetische Aspekte und auf Nachhaltigkeit, war die Datenlage jedoch bisher spärlich.

Vor diesem Hintergrund sollten mit dieser Pilotstudie erste Daten genau dazu erhoben werden. Diese zeigen zunächst einmal, dass ein aktives Wärmemanagement sowohl energieintensiv als auch potenziell abfallgenerierend ist. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, den Einsatz verschiedener Methoden unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten kritisch zu evaluieren und gezielt zu optimieren.

Konkret weisen die Daten darauf hin, dass 1.) verschiedene Verfahren der Patientenwärmung einen recht unterschiedlichen Energiebedarf aufweisen und 2.) beim Themenkomplex Klimatisierung der Raumluft im OP durchaus Potenzial zu Einsparungen besteht.

Patientennahes Wärmemanagement

Die konvektive Patientenwärmung gilt gegenwärtig als eine sehr effektive Maßnahme zur Prävention einer perioperativen Hypothermie [8]. Hierbei muss allerdings unterschieden werden zwis-

schen Wärmedecke mit Luftwärmung einerseits und Erwärmung von Infusionen andererseits. Die konvektive Patientenwärmung durch Wärmedecken mit Luftherwärmung (z. B. Bair Hugger™) erfordert im Vergleich zu den beiden anderen hier untersuchten Verfahren ein deutlich höheres Maß an elektrischer Energie, konkret etwa das 13-fache der konduktiven Patientenwärmung und nahezu das 14-fache der Infusionswärmung. Um das CO₂-Äquivalent von rund 150 g pro Betriebsstunde einer konvektiven Wärmedecke in Relation zu setzen, sei an dieser Stelle der aktuelle EU-Flottengrenzwert für Fahrzeughersteller von 95 g CO₂ pro gefahrenem Kilometer genannt [17].

Die erhebliche Diskrepanz zwischen den Verfahren lässt auf einen potenziell geringeren Wirkungsgrad des konvektiven Verfahrens „Wärmedecke“ schließen. Der kontinuierliche Luftstrom des Heizlüfters in die Wärmedecke, der durch integrierte Öffnungen wieder entweicht, könnte hierbei maßgeblich zu den doch recht erheblichen Wärmeverlusten beitragen. Dies könnte den effektiven Wirkungsgrad reduzieren und den Stromverbrauch unverhältnismäßig erhöhen. Des Weiteren ist die spezifische Wärmekapazität von Luft sehr gering, insbesondere im Vergleich zu der von Wasser [16]. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass dieses Verfahren den Einsatz von Einwegdecken aus Kunststoff erfordert. Dies führt bei jeder Anwendung zu einer zusätzlichen Produktion von Abfällen in der Größenordnung von ca. 150 g [13], welche wiederum zusätzliche Kosten verursachen.

Demgegenüber ist sowohl das konduktive Verfahren als auch der Infusionswärmer deutlich sparsamer im Energiebedarf. Ferner kommen beide Verfahren ohne umweltbelastende und kostspielige Einwegmaterialien aus. Dieser Aspekt stellt einen signifikanten Vorteil im Kontext der Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz dar und sollte bei der Gesamtbewertung der Methoden entsprechend berücksichtigt werden.

Verfahren, die ohne Einwegartikel auskommen, tragen zur Verringerung des

ökologischen Fußabdrucks bei. Sie entsprechen den Leitprinzipien „Refuse and Reduce“ der fünf Grundsätze der Ressourcenschonung und Abfallminimierung, an denen sich Bemühungen hin zur Nachhaltigkeit in der Anästhesiologie und Intensivmedizin orientieren.

Klimatisierung der Raumluft im OP-Bereich

Grundsätzlich ist die Klimatisierung einer Klinik und insbesondere des OP-Bereichs ein hochkomplexer Prozess, welcher viele unterschiedliche Anforderungen wie z. B. Hygiene, Patientenwohl und Arbeitsbedingungen des OP-Personals beinhaltet.

Dennoch soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die aktive Kühlung der Raumluft im OP und die gleichzeitig aktive Erwärmung des Patienten Prozesse sind, welche sich diametral gegenüberstehen.

Diese Erkenntnis unterstreicht die Komplexität des Wärmemanagements im OP und die Notwendigkeit, bei der Auswahl und Anwendung von Wärmemethoden sowohl klinische Effektivität als auch ökologische und ökonomische Aspekte zu berücksichtigen.

Den wenigsten dürfte wohl bewusst sein, welcher erhebliche Energieaufwand erforderlich ist, um eine konstante Klimatisierung von OP-Sälen sicherzustellen. Hierbei ist anzumerken, dass insbesondere während heißer Tage im Sommer für eine konstante OP-Raumtemperatur phasenweise eine initiale Abkühlung der Zuluft auf 16 °C erforderlich sein kann. Das Thema OP-Klimatisierung gewinnt also insbesondere bei erhöhten Außentemperaturen in den Sommermonaten an Brisanz und offenbart eine zweifache Problematik: Einerseits erhöht

sich bei einer starken Kühlung der OP-Zuluft das Risiko einer perioperativen Hypothermie für den Patienten, was wiederum eine Intensivierung der aktiven Wärmemaßnahmen erforderlich macht. Dies resultiert in einem gesteigerten Ressourcenbedarf. Andererseits führt die aktive Kühlung der OP-Zuluft zu einem erhöhten Energiebedarf, um die Raumtemperatur auf einem konstant niedrigeren Niveau zu halten.

Diese Diskrepanz zwischen der Notwendigkeit der Patientenwärmung und der gleichzeitigen aktiven Raumkühlung erscheint kontraintuitiv und wirft Fragen hinsichtlich der Effizienz und Nachhaltigkeit der aktuellen Praxis auf. Eine Optimierung dieser Prozesse könnte sowohl zu einer Verbesserung der Patientsicherheit als auch zu einer Reduktion des Energiebedarfs führen. Hierbei zeigt, im Vergleich zu den patientennahen Wärmesystemen, insbesondere die Raumluftklimatisierung des OP-Bereichs ein ganz erhebliches Einsparpotenzial.

Wie hier exemplarisch und lediglich vereinfachend aufgezeigt wurde, könnte während des Sommers durch das Anheben der OP-Zulufttemperatur von 16 °C auf 21 °C eine Leistung von rund 1.125 kWh pro Tag oder 12,25 t CO₂-Äquivalent in 30 Tagen eingespart werden. Wenn man diesen Wert in Relation zur CO₂-Emission eines Transatlantikfluges setzt, so ergibt sich über den Zeitraum von 30 Tagen ein potenzielles Einsparvolumen von neun Flügen mit einer Boeing 747-400 von Frankfurt nach New York [18].

Limitationen der Studie

In der hier beschriebenen Pilotstudie wurde lediglich der Energiebedarf im

klinischen Alltag, unabhängig von Patientenfaktoren und ohne eine konkrete Zieltemperatur untersucht. Sämtliche in dieser Arbeit analysierten Daten wurden im Kontext des operativen Routinebetriebs erhoben, wobei diverse potenzielle Fehlerquellen nicht gänzlich ausgeschlossen werden können. Eine Vielzahl an Variablen, darunter die ganz konkret vorherrschende Raumtemperatur, Art des Eingriffs, patientenseitige Faktoren, Ungenauigkeit der genutzten Geräte und Unterschiede in der Narkoseführung, sowie Unterschiede im Pre-warming konnten mitunter nur unzureichend kontrolliert werden. Basierend auf der technischen Gerätefunktion, den Herstellerangaben zur Leistungsaufnahme und der Reproduzierbarkeit der Versuche erscheinen die erhobenen Daten jedoch grundsätzlich plausibel.

Viele Aspekte des Patientenwärmemanagement konnten in dieser Pilotstudie nicht betrachtet werden. So können explizit keine Aussagen zur Effektivität der einzelnen Verfahren (konvektiv versus konduktiv) getroffen werden. Erst recht nicht kann hier eine komplette Lebenszyklusanalyse der einzelnen Komponenten vorgelegt werden. Interessanterweise kommt eine erst nach Abschluss dieser Untersuchung publizierte, methodisch sehr aufwändige Studie mit diesem Ansatz [19] allerdings zu nahezu identischen Schlussfolgerungen. Auch kann hier keine detaillierte Kostenanalyse präsentiert werden, da bezüglich der Einkaufspreise, insbesondere beim Thema Energie, aus verständlichen Gründen keine konkreten Daten zu erheben sind.

Deshalb sollen die hier vorgelegten Daten lediglich als ein erster Denkanstoß dienen. Die beiden berechneten

Szenarien im Bereich der Raumklimatisierung für den OP-Bereich sind ganz grundsätzlich rein hypothetischer Natur und dienen hier vorrangig zur Veranschaulichung der Problematik. Ferner wurde ein weiterer Aspekt unberücksichtigt gelassen: Die dem OP-Bereich stündlich zur Verfügung stehenden 70.000 m³ Luft werden stets über eine elektrische Anlage befeuchtet. Allein dieser Prozess erfordert die Verdampfung von rund 2.000 Liter Wasser pro Stunde. Dieser Prozess und die dafür benötigte Energiemenge wurden hier ganz bewusst nicht berücksichtigt, u. a. da die Menge an Feuchtigkeit, welche die Luft aufnehmen kann, wiederum von ihrer Temperatur abhängig ist.

Des Weiteren wurde für die hier angestellten Überlegungen von einem gleichbleibend konstanten Luftstrom im OP-Bereich ausgegangen und ein eventuelles Herunterfahren der Luftwechselrate in operationsfreien Zeiten nicht berücksichtigt.

Fazit und Ausblick

Aktives Wärmemanagement von operativen Patient:innen und OP-Klimatisierung sind mit teils hohen ökologischen und ökonomischen Kosten verbunden und sollten stets bewusst und mit korrekter Indikation eingesetzt werden. Hierbei muss selbstverständlich die Patientensicherheit und die Vermeidung der perioperativen Hypothermie weiterhin an erster Stelle stehen. Insbesondere im Bereich der konvektiven Patientenwärmung, aber auch im Hinblick auf die OP-Klimatisierung, bieten sich durchaus zu rechtfertigende Einsparmöglichkeiten und somit deutliche ökologische und ökonomische Vorteile. Diese Einsparungen können insbesondere für große Kliniken von signifikanter Relevanz sein. Sie bieten nicht nur das Potenzial für beträchtliche Kosteneinsparungen, sondern tragen auch maßgeblich zur Verringerung des ökologischen Fußabdrucks bei.

Die hier dargestellten Überlegungen weisen darauf hin, dass eine Anhebung der OP-Raumtemperatur im Sommer

mit einem signifikanten Rückgang des Energiebedarfs einhergehen könnte. Dieser verminderte Energiebedarf würde, je nach bezogenem Strommix, unmittelbar zu einem geringeren CO₂-Ausstoß führen.

Eine geringfügige Anhebung der OP-Raumtemperatur würde nicht nur eine Reduzierung des Energieaufwands und der CO₂-Emissionen bedeuten, sondern könnte gleichzeitig auch einen positiven Einfluss auf die Patientensicherheit haben. Auch wenn bisher keine großen Outcome-Studien zu diesem Thema vorliegen, so scheint es doch vernünftig anzunehmen, dass insbesondere das Risiko einer perioperativen Hypothermie, welche mit postoperativen Komplikationen einhergehen kann, durch eine wärmere Umgebungsluft höchstwahrscheinlich verringert würde.

Somit steht das OP-Team – wie auch die Klinikleitung – vor der wichtigen Abwägung, inwieweit der eigene thermische Komfort bei kühleren Raumtemperaturen gerechtfertigt ist, wenn dieser potenziell zulasten sowohl der Patient:innen als auch der ökologischen Nachhaltigkeit geht. Vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels und der daraus resultierenden gesundheitlichen Herausforderungen für zukünftige Generationen erscheint eine kritische und verantwortungsbewusste Auseinandersetzung mit dieser Thematik umso dringlicher.

Literatur

- Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin e.V. (DGAI): S3 Leitlinie Vermeidung von perioperativer Hypothermie. Version 2.0 (2019). AWMF-Registernummer 001-018
- Kiekks P, Fligou F, Igoumenidis M, Stefanopoulos N, Konstantinou E, Karamouzos V, et al: Inadvertent hypothermia and mortality in critically ill adults: Systematic review and meta-analysis. Aust Crit Care 2018;31:12–22
- Rajagopalan S, Mascha E, Na J, Sessler DI: The effects of mild perioperative hypothermia on blood loss and transfusion requirement. Anesthesiology 2008;108:71–77
- Romlin B, Petruson K, Nilsson K: Moderate superficial hypothermia prolongs bleeding time in humans. Acta Anaesthesiol Scand 2007;51:198–201
- Frank SM, Fleisher LA, Breslow MJ, Higgins MS, Olson KF, Kelly S, et al: Perioperative maintenance of normothermia reduces the incidence of morbid cardiac events. A randomized clinical trial. JAMA 1997;277:1127–1234
- Melling AC, Ali B, Scott EM, Leaper DJ: Effects of preoperative warming on the incidence of wound infection after clean surgery: a randomised controlled trial. Lancet 2001;358:876–880
- Bräuer A, Russo M, Nickel EA, Bauer M, Russo SG: Anwendungsrealität des perioperativen Wärmemanagements in Deutschland - Ergebnisse einer Online-Umfrage. Anästh Intensivmed 2015;56:287–297
- Torossian A, Bräuer A, Höcker J, Bein B, Wulf H, Horn EP: Preventing inadvertent perioperative hypothermia. Dtsch Arztebl Int 2015;112:166–172
- Deutsche Gesellschaft für Krankenhausthygiene e.V. (DGKH): Krankenhausthygienische Leitlinie für die Planung, Ausführung, und Überwachung von Raumlufttechnischen Anlagen für OP-Bereiche und Eingriffsräume. Hygiene & Medizin 2023;48:244–253
- Schuster M, Richter H, Pecher S, Bein T, Grüßer L, Kowark A, et al: Updated position paper on “Ecological sustainability in anaesthesiology and intensive care medicine” with specific recommendations for action of the German Society for Anesthesiology and Intensive Care Medicine and the Professional Association of German Anesthesiologists—Update 2024: Compiled by the Forum Sustainability in Anesthesiology from the Professional Association of German Anesthesiologists (BDA) and the German Society for Anesthesiology and Intensive Care Medicine (DGAI). Anästhesiologie 2025;74:294–304
- Gonzalez-Pizarro P, Brazzi L, Koch S, Trinks A, Muret J, Sperna Weiland N, et al: European Society of Anaesthesiology and Intensive Care consensus document on sustainability: 4 scopes to achieve a more sustainable practice. Eur J Anaesthesiol 2024;41:260–277
- Umweltbundesamt: CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom 2024. Artikel vom 09.04.2025. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-2024> (Zugriffsdatum: 25.04.2025)

13. solventum Bair Hugger: 3M™ Bair Hugger™ Wärmedecken. Produktdatenblatt 2024. <https://multimedia.3m.com/mws/media/1689290O/3m-bair-hugger-warming-blankets-2-pager-dach-de.pdf> (Zugriffsdatum: 25.04.2025)
14. Baehr HD, Kabelac S: Thermodynamik des Heizens und Kühlens. In Baehr HD, Kabelac S (Hrsg): Thermodynamik. Berlin: Springer 2016:596
15. Bräuer A: Perioperativer Erhalt der Körpertemperatur. Anästh Intensivmed 2018;59:587–596
16. Bräuer A, Quintel M: Forced-air warming: technology, physical background and practical aspects. Curr Opin Anaesthesiol 2009;22:769–774
17. Europäische Union: Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32009R0443> (Zugriffsdatum: 25.04.2025)
18. Klimareferat der Stadt Frankfurt am Main: Mit Flugzeug und Bahn in den Urlaub (2025); <https://klimaschutz-frankfurt.de/mit-flugzeug-und-bahn-in-den-urlaub/> (Zugriffsdatum: 25.04.2025)
19. Rebello TA, Spoyalo K, Chhipi-Shrestha G, Hewage K, Sadiq R, MacNeill AJ: Sustainability assessment of perioperative patient warming devices: a comparative life cycle assessment and costing. Br J Anaesth 2025;135:440–448.

Korrespondenz- adresse

**Prof. Dr.
Berthold Drexler**



Universitätsklinik für Anästhesiologie
und Intensivmedizin

Universitätsklinikum Tübingen
Hoppe-Seyler-Straße 3
72076 Tübingen, Deutschland

E-Mail: berthold.drexler@med.uni-tuebingen.de

ORCID-ID: 0000-0001-7202-1511