

HOCHSCHULE RHEINMAIN



BAUELEMENTE FÜR ENERGIESYSTEME

Zielformulierung und Konzipierung nICE.Cube (Arbeitstitel)

Autoren

CIHAN ÜNLÜ

DENNIS HUNTER

KONSTANTINOS AGLOUPAS

FACHBEREICH INGENIEURWISSENSCHAFTEN

STUDIENBEREICH ANGEWANDTE PHYSIK & MEDIZINTECHNIK

Datum: 31. Juli 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Zielformulierung	3
2	Produktbeschreibung	4
2.1	Technische Daten	5
3	Detaillierung	6
3.1	Stückliste	7
A	Anhang A	8
A.1	Pflichtenheft	8
A.2	Marktforschung	8
A.3	Mindmap	10
A.4	Materialien und Regularien	12
A.4.1	Normen und Regularien	12
A.4.2	Auswahl Dämmmaterialien	12
A.5	Überschlagsrechnung Energiebedarf	12
A.6	Dimensionierung Photovoltaikmodul	14
A.7	Volumenberechnung	14
A.8	Elektronik	14
B	Zeichnungen	16
	Literatur	20

1 Zielformulierung

Hygienisches, schockabsorbierendes und handliches Kühltransportgefäß mit autarker Energieversorgung und Temperaturregelung für mechanisch und/oder thermisch empfindliches medizinisches Transportgut. Es verfügt über eine integrierte Kühllösung, die Temperaturen im Innenbereich von -20 °C über $\geq 48\text{ h}$ aufrecht erhalten kann und dabei durch seine kompakte Bauweise von einer einzelnen Person transportiert werden kann.

Medizinisches Transportgut ist hier im Sinne der des *Medizinischen Produkte Gesetzes* zu verstehen [2].

2 Produktbeschreibung

Das Transportgefäß ›nICE.cube‹ dient dazu, empfindliches Transportgut aus dem medizinischen Bereich mit erhöhten Ansprüchen an die Transportumgebung in ihrem 17 L fassenden Innenraum gekühlt zu lagern. Bedingt durch die hervorragende thermische Dämmung aus Graphen-Aerogel ist das Produkt in der Lage, bei 40 °C Außentemperatur eine Innentemperatur von –20 °C unter Abwesenheit einer aktiven Kühlung über einen Zeitraum von 5 h ohne kritischen Temperaturanstieg zu halten.

Eine aktive Kühlung wird durch einen 12 V Kompressor vom Typ *CASCADE* des Herstellers MASTER-FLUX bereit gestellt. Die Spannungsversorgung erfolgt im Stützbetrieb wahlweise durch Anbindung per Kaltgerätesteckverbindung an ein 230/110 V 50/60 Hz AC Netz oder eine 12 V-24 V Gleichstromquelle.

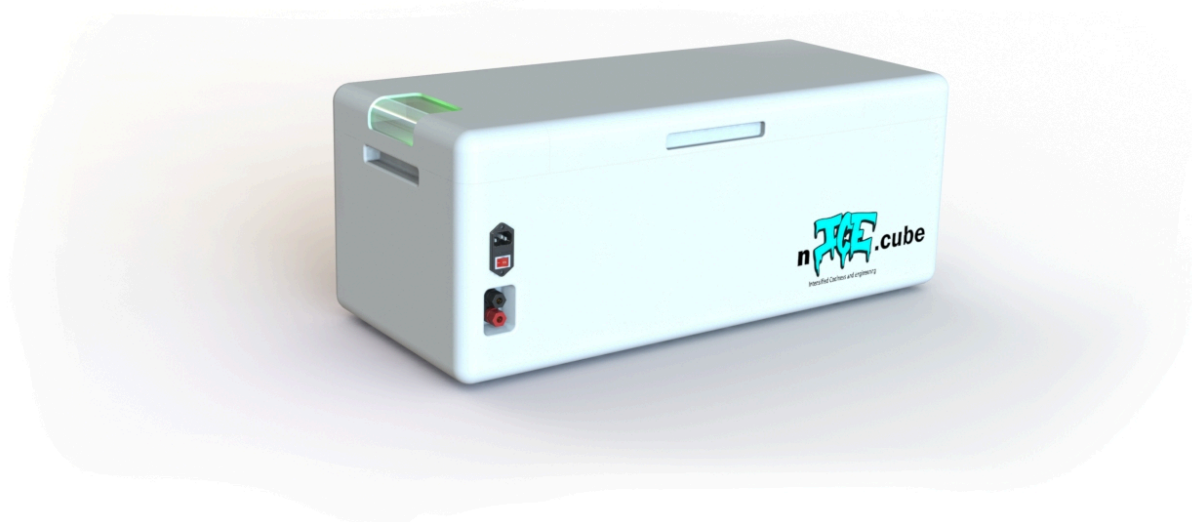


Abb. 2.1: Transport- und Kühleinheit *nICE.cube*.

Um einen autarken Betrieb von mindestens 48 h aufrecht zu erhalten ist ein 74 W h Li-Ion-Akku verbaut. Um im mobilen Einsatz auch bei längeren Transportwegen die Kühlung sicher gewährleisten zu können, kann das Produkt von anderen ›nICE.cube‹ parallel versorgt oder durch das mitgelieferte Photovoltaikmodul, welches eine Spitzenleistung von 250 W_p liefert, gespeißt werden.

Am besonders energieeffizienten eInk-Display lassen sich jederzeit Parameter wie Innentemperatur, Akkustand Außentemperatur oder geschätzte Restlaufzeit¹ kontrollieren. Erreicht der Innenbereich eine vom Benutzer gesetzte kritische Temperatur oder einen niedrigen Akkustand wird über sich am Display befindliche Pieper und LEDs wahlweise akustisch und/oder visuell alarmiert.

Während die Schalung aus ABS-Kunststoff Komponenten wie Elektronik, Akku und Kompressor vor mechanischen Umwelteinflüssen schützt, sorgt die Schock- und Vibrationsdämpfende Aufhängung des Innenbereichs für einen sicheren Transport auch im Gelände.

¹In Abhängigkeit der historischen Außentemperatur und momentanem Akkustand.

2.1 Technische Daten

Die technischen Daten des »nICE.cube« im Überblick:

Tab. 2.1: Technische Daten

Mechanisch	
Äußere Dimensionen	813 x 358 x 314 (LxBxH, Einheiten in mm)
Nutzvolumen	16,72 L
Gesamtgewicht	22 kg
Elektrisch	
Kapazität Akku	72 W h
Versorgungsspannung AC	230/110 V 50/60 Hz
Versorgungsspannung DC	12 – 24 V
Kühlleistung	27,65 W [6]

3 Detaillierung

Die Transporteinheit *nICE.cube* erfüllt den Zweck, Krisengebiete mit extremen Wetterbedingungen mit Medikamenten und Impfstoffen zu versorgen, indem das Kühlgut sicher transportiert werden kann.

Die Kühlung des Nutzvolumens erfolgt durch eine Kompressionskälteanlage mit einer maximalen Kühlleistung von 27,65 W. Die zentrale Komponente bildet hier ein Kompressor der *CASCADE*-Serie des Herstellers *Masterflux* – ein in seiner Klasse besonders energieeffizientes und spezifisch für den Einsatz im medizinischen Sektor entwickeltes Gerät.

Die hervorragende thermische Isolation des Primärvolumens durch Graphen-Aerogel (vgl. table A.4) reduziert die Betriebszeiten der Kälteanlage und damit den Energiebedarf des *nICE.cube* auf ein Minimum.

Zum autarken Betrieb ist ein Energiespeicher bestehend aus 32 Li-Ion-Zellen der Bauform 18650 verbaut. In 4S8P-Konfiguration liefern sie eine nominelle Versorgungsspannung der Systemkomponenten von 14,8 V bei einer Gesamtkapazität von 296 Wh¹. Die bereits geringe Belastung des Energiespeichers durch Entladeströme je Zelle bei Volllast von $\approx 0,25$ A wird durch thermische Überwachung jeder Einzelzelle garantiert. Über die Lebensdauer hinweg werden Lade- und Entladezyklen sowie Ströme und Spannungsverläufe aufgezeichnet, um die Nutzenden jederzeit über den Zustand des Akkus informieren zu können.

Die Ladung erfolgt wahlweise stationär durch das lokale AC-Versorgungsnetz oder im mobilen Einsatz durch Anschluss eines Photovoltaikmoduls. Die äußeren Dimensionen des *nICE.cube* betragen $(813 \times 358 \times 314)$ mm (LxBxH). Als Nutzvolumen steht mit Abmessungen von $\approx (400 \times 248 \times 173)$ mm ein Volumen von 16,72 L zur Verfügung.

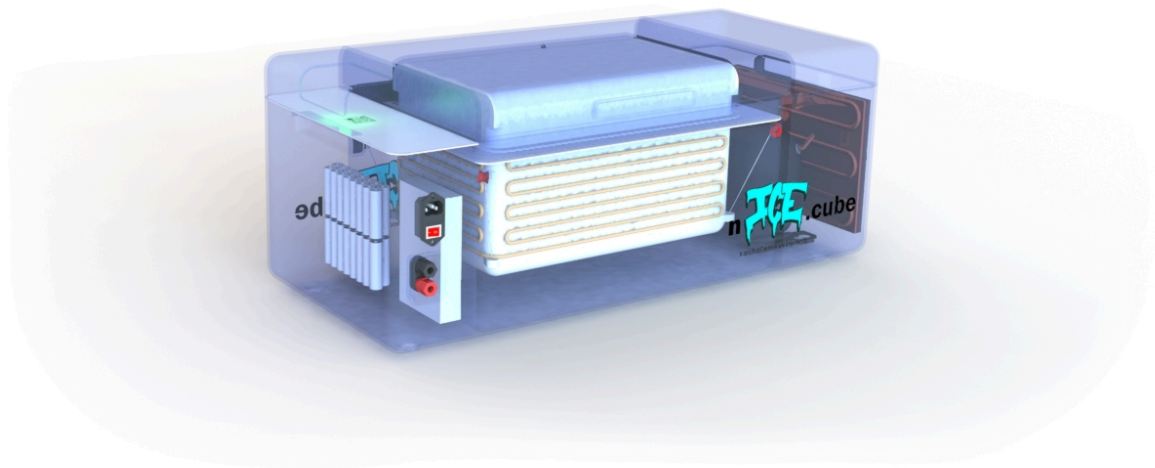


Abb. 3.1: Konzeptansicht des *nICE.cube* mit Blick auf die innenliegenden Komponenten.

¹Reduktion durch Verschleiß/Nutzungsverhalten möglich.

3.1 Stückliste

Tab. 3.1: Stückliste (vgl. fig. B.2)

Pos.	Menge	Einheit	Benennung	Bemerkung
1	1	Stk.	Ansaugverbindung	
2	4	Stk.	Aramidschnur	
3	1	Stk.	Druckreduzierer	
4	2	Stk.	Durchführung	
5	1	Stk.	Dämpfer	
6	1	Stk.	E-Ink Display	1.54"
7	1	Stk.	Ein-/Ausgabepanel	
8	4	Stk.	Elektronik	
9	1	Stk.	Elektronikdeckel	
10	1	Stk.	Gummimanschette	
11	1	Stk.	Hülle	
12	1	Stk.	Kompressor	CASCADE17-0146Y1
13	1	Stk.	Kompressordeckel	
14	1	Stk.	Kältemittelverbindung von Verflüssiger	
15	1	Stk.	Kältemittelverbindung zu Verflüssiger	
16	32	Stk.	Li-Ion 18650	4S8P Konfiguration
17	1	Stk.	Reduzierer	
18	1	Stk.	Transportgutbehälter	
19	1	Stk.	Trockner	
20	1	Stk.	Verflüssiger	
21	1	Stk.	Verschlussdeckel außen	
22	1	Stk.	Verschlussdeckel innen	
23	1	Stk.	DC-Anschluss	Buchse für 4, 2 mm Laborstecker mit Polschraube (Bipolar)
24	1	Stk.	AC-Anschluss	C14 AC Buchse mit Schalter und Si- cherungshalter

A Anhang A

A.1 Pflichtenheft

Tab. A.1: Liste mit Festanforderungen.

Festanforderungen	Erläuterung
Hygienisch	Das Material muss Kontamination durch Verkeimung oder Ähnlichem weitestgehend unterbinden. Die Geometrie muss eine einfache und gründliche Reinigung ermöglichen.
Thermisch geregelt	Die Innentemperatur muss einstellbar sein und einem Regelkreis unterliegen.
Thermische Isolierung	Die innere Temperatur muss weitgehend stabil gehalten werden.
Autarke Energieversorgung	Erneuerbare Energien nutzend muss das Gerät über eine eigene Spannungsversorgung verfügen.
Integrierter Energiespeicher	Im Offline-Betrieb und bei Ausfall der eigenen Spannungsversorgung muss das Produkt betriebsfähig bleiben.
<i>Cradle-to-cradle</i>	Sämtliche verbauten Komponenten müssen einem biologischen oder technischen Kreislauf zurückgeführt werden können.
Kompakte und leichte Bauweise	Das Produkt muss beladen von einer Einzelperson transportiert werden können.
Schockfreie Lagerung des Inhalts	Der Nutzraum muss von starken Erschütterungen entkoppelt sein.
Alarmierung bei kritischer Temperatur	Die Nutzenden müssen über kritische Temperaturzustände informiert werden.
Alarmierung bei kritischem Akkustand	Die Nutzenden müssen über kritische Energieversorgung informiert werden.

Tab. A.2: Liste nicht zu unter- oder gegebenenfalls überschreitender Parameter.

Mindestanforderungen	Erläuterung
Kühlung $\leq (-20 \pm 1) ^\circ\text{C}$	Der Innenraum muss auf mindestens $-20 ^\circ\text{C}$ heruntergekühlt werden können.
Temperaturstabil $\geq 48 \text{ h}$	Die Temperatur muss min. 48 h lang gehalten werden.
Gewicht $\leq 20 \text{ kg}$	Die Box soll ein Leergewicht von max. 20 kg besitzen.

A.2 Marktforschung

Es wurden Marktforschungen betrieben, um eine Übersicht der konkurrierenden Kühlboxen zu erhalten.

Tab. A.3: Liste von Eigenschaften, die das Produkt im Rahmen der Machbarkeit weiterhin aufweisen könnte.

Wunschanforderungen	Erläuterung
Innenbeleuchtung	Bei schlechter Außenbeleuchtung sollte der Inhalt dennoch gut erkennbar sein.
Statusanzeige	Die Nutzenden sollen sich jederzeit über den Status des Produktes – Temperatur, Leistungsaufnahme und -abgabe, Restkapazität – informieren können.
Modularer Aufbau	Einzelne funktionale Komponenten sollen leicht austauschbar sein.
Verbundbetrieb	Mehrere der Produkte sollen im Verbund betrieben werden können. Hierzu zählt Stützbetrieb einzelner Geräte durch andere, sowie gesammelte Statusanzeigen.
Kompatibilität verschiedener ext. Spannungsversorgungen	Das Gerät soll an möglichst vielen verschiedenen externen Versorgungsspannungen betrieben werden können.

T0022 FDN von EBERSPÄCHER

- Temperatur von $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Spannung 12 V / 24 V DC
- (65 – 70) mm PU Wandausschämung
- Kältemittel R134a (Tetrafluorethan)
- Gewicht von 20,5 kg
- Außenabmessung 375 x 585 x 480 (BxTxH, Einheiten in mm)

ICY 20 von FRIGOLAB COLD TECHNOLOGY

- Temperaturen von $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Außenabmessung 515 x 345 x 425 (BxTxH, Einheiten in mm).
- Digitales Display.
- Kühlung durch einen Kompressor.
- Kältemittel R134a (Tetrafluorethan).
- Versorgung von 12 V / 24 V DC oder 230 V AC.
- Gewicht von 18 kg.
- Resistent gegen Schock und mechanische Belastungen.
- CFC- und HCF-freie Polyurethanschaum.

TC 702 von TRITEC

- Temperaturen von $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- Außenabmessung 375 x 585 x 480 (B x T x H, Einheiten in mm).
- Durch Autobatterie mit 12 V / 24 V DC betrieben.
- Umschalter für Netzbetrieb (230 V AC).
- Stabiler und stoßfester UVA-beständiger Kunststoff.
- Deckel mit spezieller Verriegelung.
- Dämmung mit FCKW-freiem PU-Hartschaum von 80 mm Dicke.
- Reinigungsmittelresistent.
- Alarmmeldungen bei möglichen Fehlern des Gerätes.
- Kompressor mit einem R52A Kältemittelgemisch.

T0022/T0032 von COLDTAINER

- Temperatur von -24 °C bis 40 °C
- Spannungsversorgung 12 / 24 V DC
- (65 – 70) mm PU-Wandausschämung
- Kältemittel R134a (Tetrafluorethan)
- Gewicht von 20,5 kg
- $\approx 23\text{ L}$ Kapazität

A.3 Mindmap

Nach den ersten Überlegungen zu den Anforderungen und Funktionen des Transportgefäßes kann eine Übersicht anhand eines Mindmaps wie in Abb. A.1 gestaltet werden.

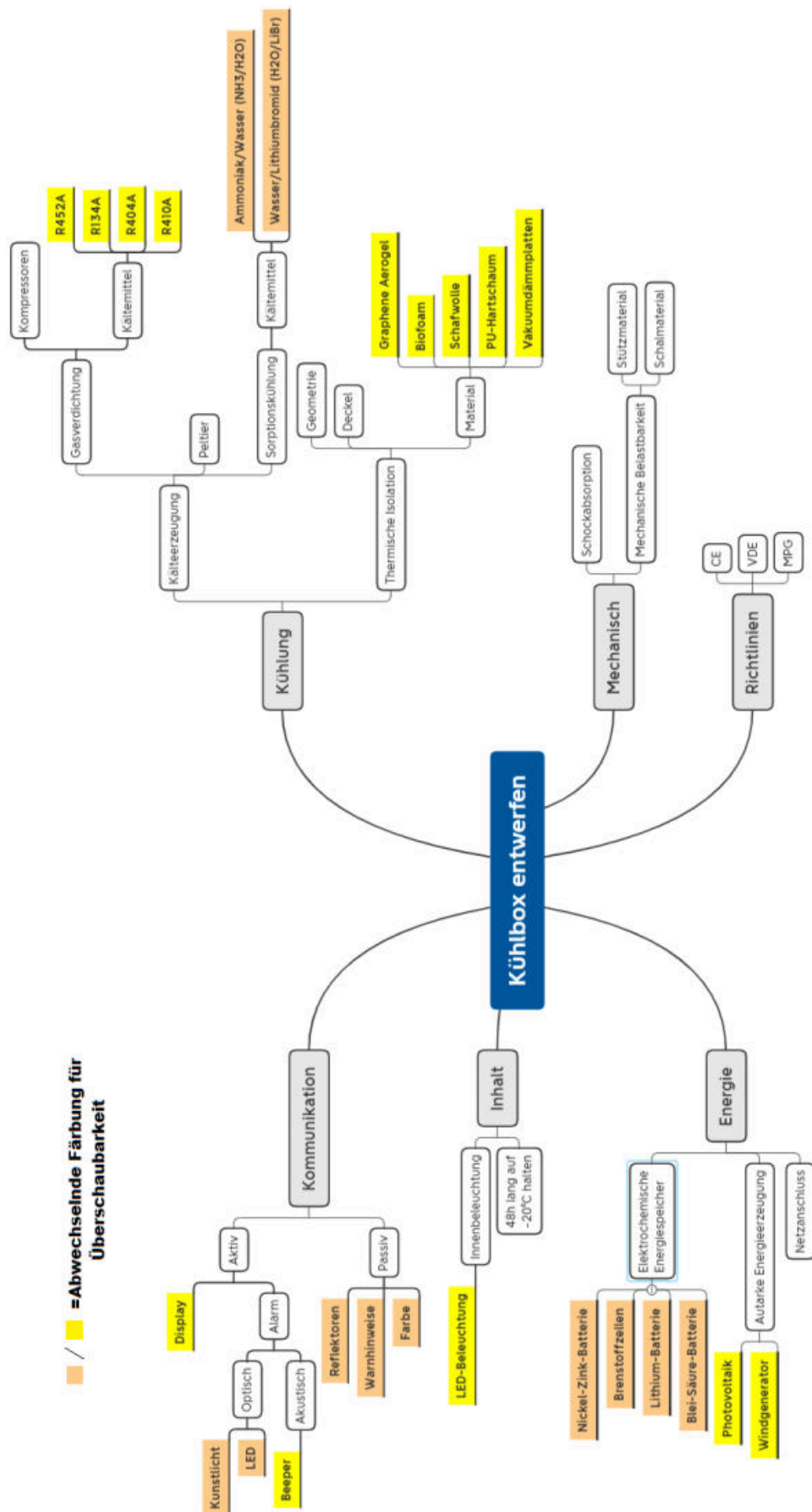


Abb. A.1: Mindmap.

A.4 Materialien und Regularien

A.4.1 Normen und Regularien

Dem BUNDESINSTITUT FÜR ARZNEIMITTEL UND MEDIZINPRODUKTE zu Folge ist „ein Absehen von der Genehmigung einer klinischen Prüfung“ [1] möglich, wenn das Produkt etwa den Medizinprodukten der Klasse I zuzuordnen ist [2]. Die Klassifizierung von medizinischen Produkten wiederum ist durch die *Richtlinie 93/42/EWG* geregelt. In *Anhang IX* ist zu lesen:

„Alle nicht invasiven Produkte gehören zur Klasse I [..]“ [3]

mit Ausnahme derer nicht-invasiven Produkte, die in folgenden Punkten aufgeführten Regelungen Anwendung finden. Es ist anzunehmen, dass dies hier nicht der Fall ist.

Dennoch handelt es sich um ein Gerät, dass, um für den europäischen Markt zugelassen werden zu können eine CE-Kennzeichnung benötigt und somit die damit verbundenen Auflagen erfüllen muss. Die relevante Norm scheint hier DIN EN 60601.

Weiter wird eine VDE-Kennzeichnung benötigt, da es sich um ein in einer Form elektrisch betriebenes Gerät handelt. Dies wird um so relevanter, wenn ein Betrieb an Netzspannung möglich oder vorgesehen ist.

A.4.2 Auswahl Dämmmaterialien

Tab. A.4: Übersicht möglicher Materialien zur thermischen Dämmung.

(Handels-)Name	$\lambda / \frac{mW}{m \cdot K}$	$\rho / \frac{mg}{cm^3}$	E-Modul / kPa	Druckfestigk. / kPa
Luft	25,7	1,2041	–	–
Graphen/Silizium Aerogel [5]	7,3 – 9		$(2,4 – 4) \cdot 10^3$	
Biofoam (Algen) [7]		30		
Biobasiertes PU [4]	33	18,5	176,7	15,4
Air laid feather fibre [10]	30 ¹			> 30 ²
Vakuumdämmplatte [8]	37 – 31	16,3 – 59,4		

¹Bei $-10^\circ C$

²Nach 10 minütigem Eintauchen in flüssigen Stickstoff ($-195^\circ C$)

A.5 Überschlagsrechnung Energiebedarf

Annahme: 20 L Innenraum; zu 80 % gefüllt mit Wasser (16 L $\hat{=}$ 16 kg)

Betrachtung: Energien beim Herunterkühlen von Wasser bei RT ($20^\circ C = 293 K$) auf $-20^\circ C = 253 K$

Je kg umgewandelte Wärmeenergie = Änderung der spezifischen Enthalpie:

Für $20^\circ C \rightarrow 0^\circ C$:

$$\Delta h_1 = \frac{\Delta Q_1}{m} = c_{Wasser} \cdot (T_0 - T_{20}) = 4,19 \frac{kJ}{kg K} \quad (A.1)$$

$$= -83 \frac{kJ}{kg} \quad (A.2)$$

Zum Erstarren:

$$\begin{aligned}\Delta h_2 &= h_{\text{erstarr,Wasser}} = -h_{\text{fus,Wasser}} \\ &= -334 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\end{aligned}\quad (\text{A.3})$$

Für $0^\circ\text{C} \rightarrow -20^\circ\text{C}$:

$$\begin{aligned}\Delta h_3 &= c_{\text{Eis}} \cdot (T_{-20} - T_0) = 2,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot (253 \text{ K} - 273 \text{ K}) \\ &= -40 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\end{aligned}\quad (\text{A.4})$$

$$\begin{aligned}\Delta h_{\text{ges}} &= \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 = -83,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 334 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 40 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -457,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ \Rightarrow \Delta Q_{\text{ges}} &= \Delta h_{\text{ges}} \cdot m = -457,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 16 \text{ kg} \\ &= -7324,8 \text{ kJ} \approx \underline{\underline{-7,3 \text{ MJ}}}\end{aligned}\quad (\text{A.5})$$

Benötigte Energie, um eine Temperaturdifferenz aufrechtzuerhalten:

Mit einer Schichtdicke des thermischen Isoliermaterials von $l = 0,05 \text{ m}$, der Gesamtfläche A des Kühlraums von $\approx 0,208 \text{ m}^2$ und einer thermischen Leitfähigkeit von $\lambda = 7,3 \frac{\text{mW}}{\text{m K}}$ lässt sich der thermische Widerstand zu $R_{th} \approx 33 \frac{\text{K}}{\text{W}}$ abschätzen.

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda \cdot A} = \frac{0,05 \text{ m}}{7,3 \frac{\text{mW}}{\text{m K}} \cdot 0,208 \text{ m}^2} \approx 33 \frac{\text{K}}{\text{W}} \quad (\text{A.6})$$

$$\begin{aligned}\dot{Q} = P &= \frac{(T_{\text{aussen}} - T_{\text{innen}})}{R_{th}} \\ &= \frac{313,15 \text{ K} - 253,15 \text{ K}}{33 \frac{\text{K}}{\text{W}}} \\ &\approx 1,81 \text{ W} \\ \Rightarrow &\approx 87,27 \text{ W h} \quad (\text{Für } 48 \text{ h})\end{aligned}\quad (\text{A.7})$$

Bei einer Außentemperatur von 40°C und einer Anfangsinnentemperatur von -20°C mit der Annahme, dass 33 % des Nutzvolumens von $16,72 \text{ L}$ mit Wasser und 66 % mit Luft gefüllt sind, wird von einer Dauer von $t_{krit} = 14,2 \text{ h}$ ausgegangen, bis sich der Innenraum um 2 K erwärmt hat.

$$\begin{aligned}t_{krit} &= \frac{\Delta T}{\dot{Q}} \cdot [(0,66 \cdot \rho_{aq} V \cdot c_{aq}) + (0,33 \cdot \rho_{luft} V \cdot c_{luft})] \\ &= \frac{2 \text{ K}}{1,81 \text{ W}} \cdot \left[\left(0,66 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0167 \text{ m}^3 \cdot 4200 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(0,33 \cdot 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0167 \text{ m}^3 \cdot 1005 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right) \right] \\ &\approx 51.159 \text{ s} \approx 14,2 \text{ h}\end{aligned}\quad (\text{A.8})$$

$$\begin{aligned}\Delta T &= \frac{\Delta Q}{0,66 \cdot \rho_{aq} V \cdot c_{aq}} \\ &= \frac{1,81 \text{ W} \cdot 5 \text{ h} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}}{0,66 \cdot 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (16,72 \cdot 10^{-3}) \text{ m}^3 \cdot 4200 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}} \\ &\approx 0,7 \text{ K}\end{aligned}\quad (\text{A.9})$$

A.6 Dimensionierung Photovoltaikmodul

Mithilfe der Photovoltaik kann der Akku bei Tageslicht geladen und die Kühlung somit aufrecht erhalten werden. Hierbei ist einem monokristallines PV-Modul bei einer Fläche von 9 m^2 eine Spitzenleistung von mindestens 1 kW_p zu entnehmen [9]. Zum Betrieb des *nICE.cube* und Laden seines Energiespeichers ist ein Viertel der Leistung ($\cong 250 \text{ W}_p$) ausreichend. Dies entspricht einer effektiven Fläche von $2,25 \text{ m}^2$

A.7 Volumenberechnung

Das Nutzvolumen setzt sich aus der Länge L , Breite B und Höhe H der inneren Box zusammen.

$$\begin{aligned} V_{\text{nutz}} &= L \cdot B \cdot H \\ &= 4,00 \text{ dm} \cdot 2,48 \text{ dm} \cdot 1,73 \text{ dm} \\ &= 17,16 \text{ L} \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

Im Sinne thermischer und mechanischer Optimierung wurden Verrundungen mit $r = 4 \text{ mm}$ entlang der Innenkanten des Nutzvolumens platziert. Diese reduzieren das effektive Nutzvolumen auf $16,72 \text{ L}$.

A.8 Elektronik

Die Verbindung der jeweiligen Elektronikkomponenten wird in fig. A.2 schematisch dargestellt.

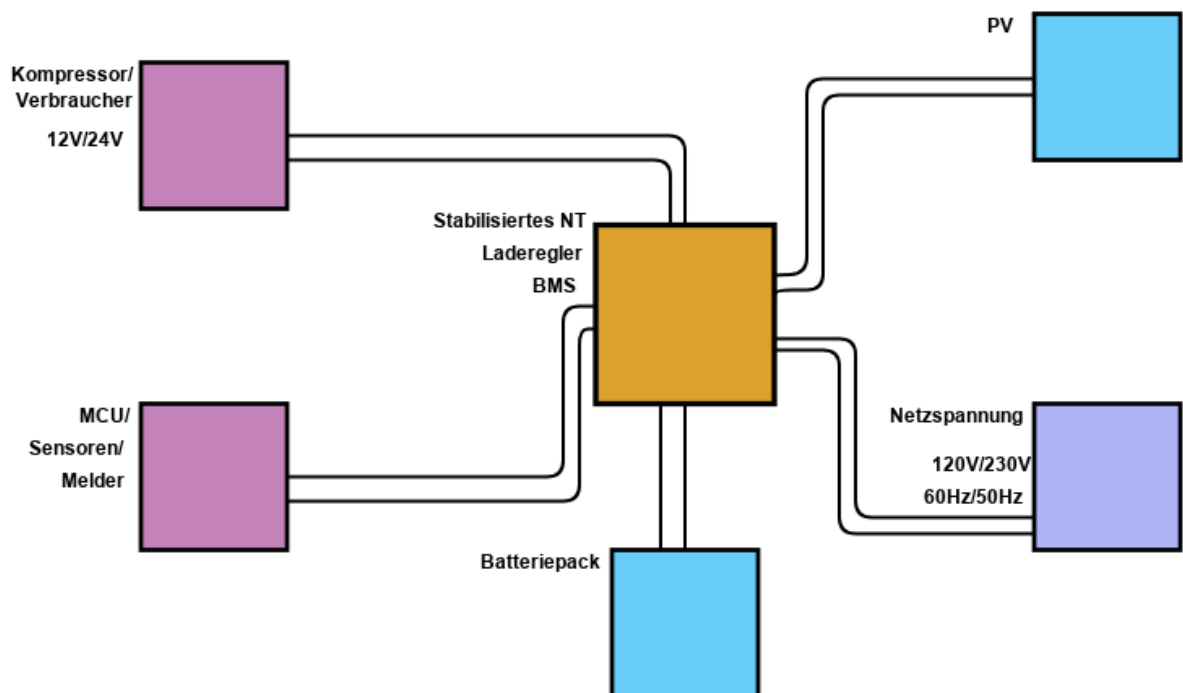


Abb. A.2: Schaltschema der Elektronik.

Sowohl die interne als auch sämtliche externe Spannungsversorgungen werden vom internen Netzteil auf den Lastkreis von 12 V , sowie die Versorgungsspannung der Boardelektronik geregelt. Das im Netzteil integrierte Batteriemanagement übernimmt hierbei die Überwachung des Akkuzustandes. Daten wie Außen- und Innentemperatur, Temperatur der Akkuzellen, Statistiken zum Zustand des Akkus etc. laufen zentral im

Mikrocontroller zusammen, werden dort verarbeitet und gegebenenfalls an die Meldesysteme weitergegeben.

Um Raum einzusparen und das Kühlkonzept der Boardelektronik zu vereinfachen wurden in der Realisierung Mikrocontroller, Batteriemanagement und Netzteil in einem Bauteil vereint (Pos. 8 in table 3.1).

B Zeichnungen

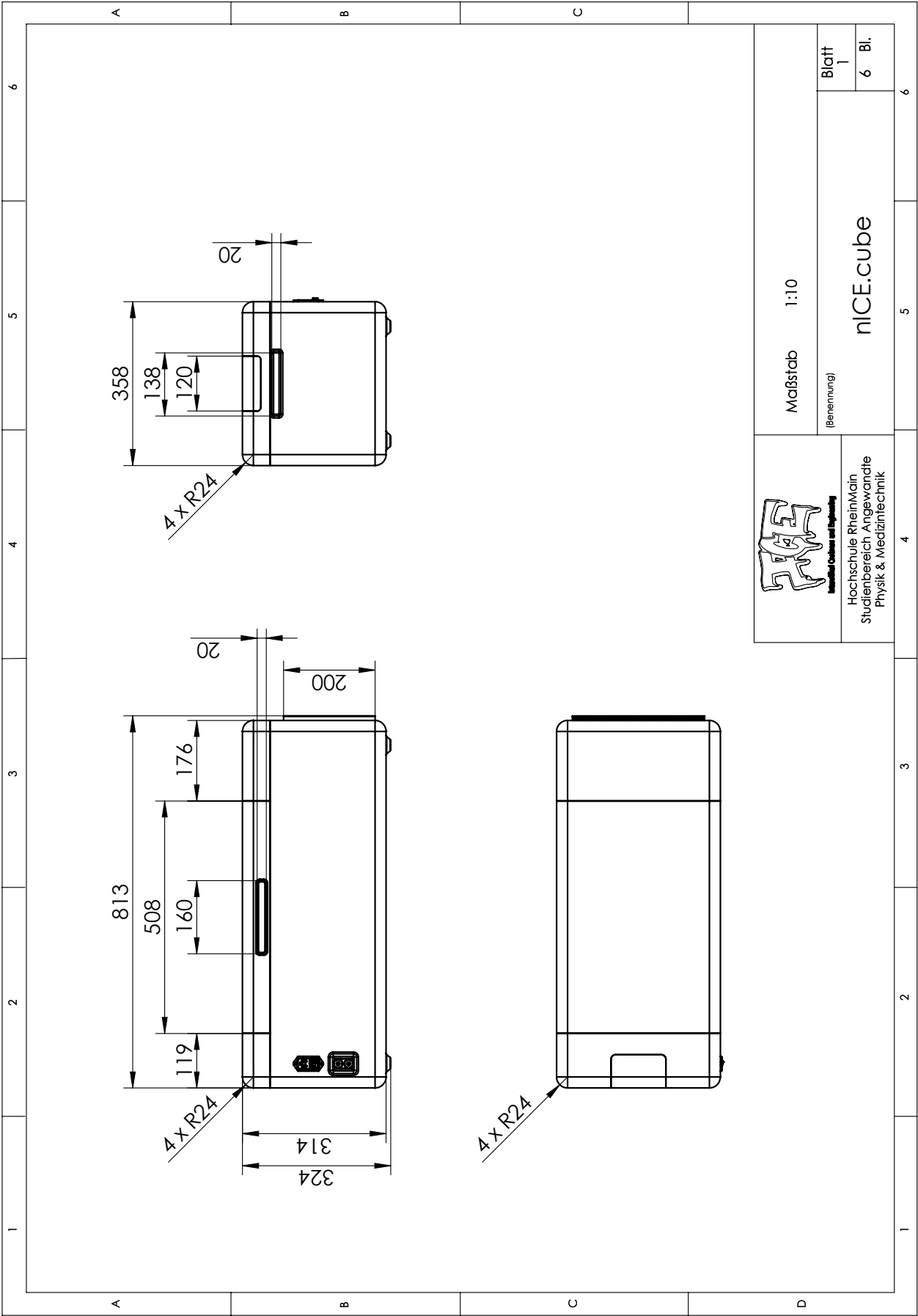


Abb. B.1: Äußere Dimensionen des nICE.cube.

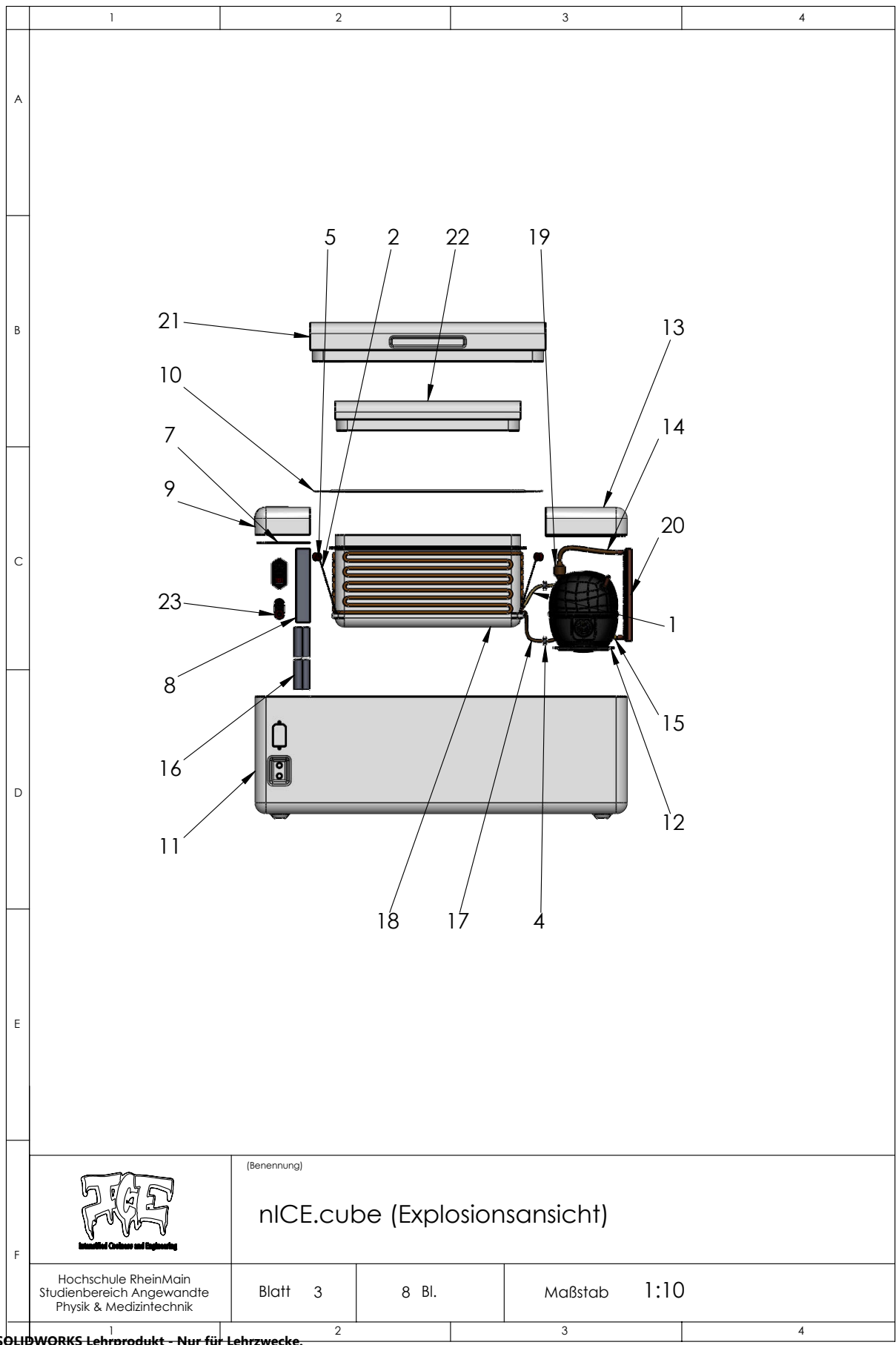


Abb. B.2: Explosionsansicht und Positionsnummern der Kernkomponenten.

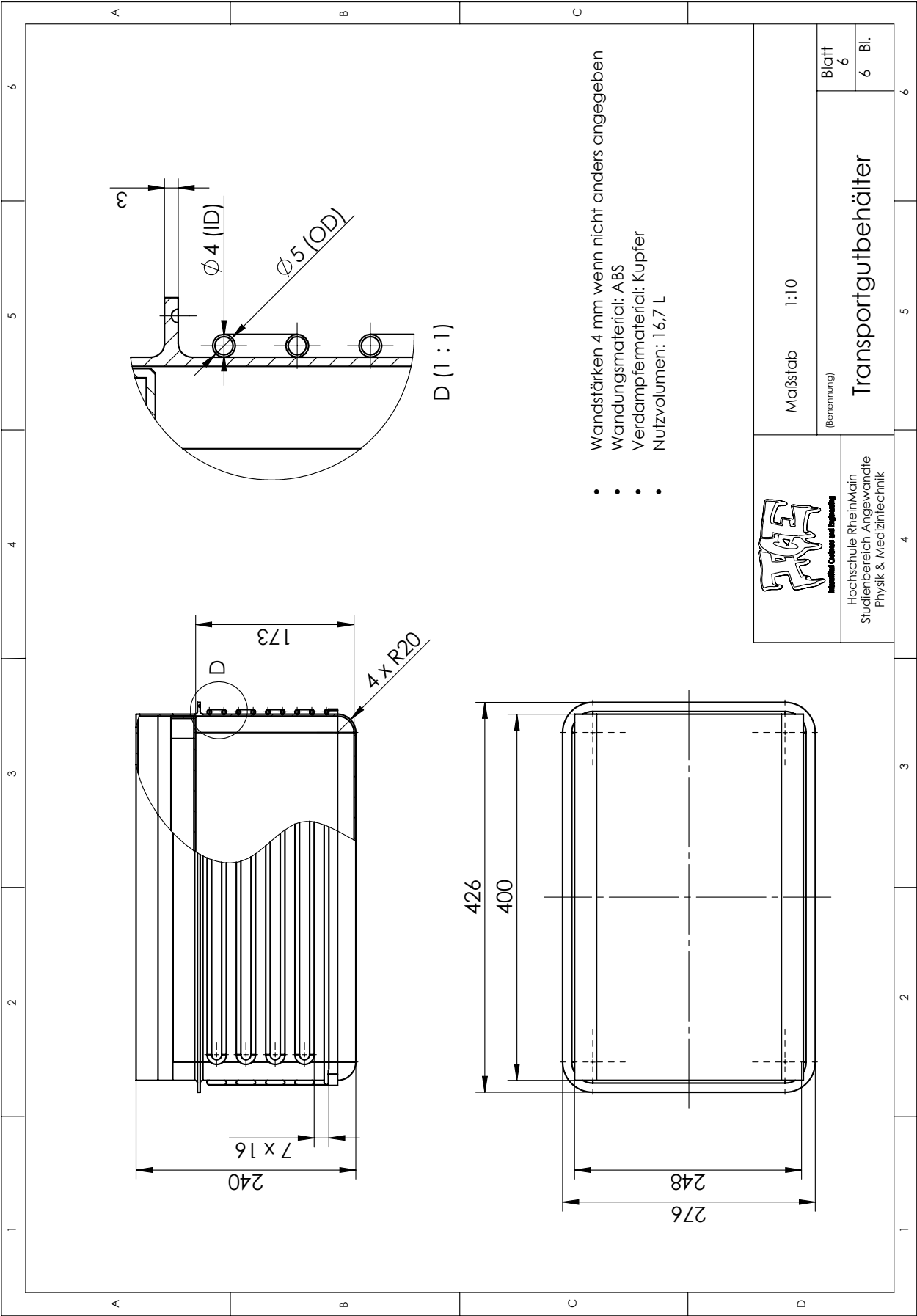


Abb. B.3: Detailzeichnung des Kühlbehälters.

Literatur

- [1] BfArM. *Antrag auf Absehen von der Genehmigungspflicht*. URL: https://www.bfarm.de/DE/Medizinprodukte/KlinischePruefung/AbsehenVonDerGenehmigungspflicht/_node.html (besucht am 07. 05. 2021).
- [2] Bundesrepublik Deutschland. *Medizinische Produkte Gesetz*. MPG. 7. Mai 2021. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/mpg/index.html#BJNR196300994BJNE001903377> (besucht am 07. 05. 2021).
- [3] European Council. *Council Directive 93/42/EEC*. Version 1993L0042 — EN — 11.10.2007 — 005.001. 14. Juni 1993. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1620368811646&uri=CELEX%3A01993L0042-20071011> (besucht am 05. 05. 2021).
- [4] Huang, X., Qi, J., De Hoop, C., Xie, J., and Chen, Y. *Biobased polyurethane foam insulation from microwave liquefaction of woody underbrush*. NC State University, 2017. URL: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2017/09/BioRes_12_4_8160_Huang_QHXC_Biobased_PU_Foam_Insulation_Liquefaction_Woody_Underbrush_12704.pdf (besucht am 02. 05. 2021).
- [5] Lei, Yaofei u. a. „Enhancements of thermal insulation and mechanical property of silica aerogel monoliths by mixing graphene oxide“. In: *Materials Chemistry and Physics* 187 (2017). PII: S0254058416308975, S. 183–190. ISSN: 02540584. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2016.11.064.
- [6] Masterflux. *Datenblatt CASCADE17-0146Y1*. URL: https://www.masterflux.com/userimages/CASCADE17-0146Y1_DATA_SHEET.pdf (besucht am 27. 07. 2021).
- [7] Morrison, Robert L. „Biofoam II. US19940215159;US19930043300“. C08J9/00;C08J9/28;C08J9/26;C08J9/28. US5360828 (A) (US). UNIV CALIFORNIA. 1994.
- [8] Nagarajan, Venkata S. und Grieco, William J. „VACUUM INSULATED PANEL. US201314067025“. F16L59/07;B32B37/10;E04C2/02. US2015118434 (A1) (US). OWENS CORNING INTELLECTUAL CAP. 2015.
- [9] Wesselak, Viktor und Voswinckel, Sebastian. *Photovoltaik. Wie Sonne zu Strom wird*. ger. Technik im Fokus. Berlin: Springer Vieweg, 2012. 129 S. ISBN: 978-3-642-24297-7.
- [10] Zhao, Yuanxiang, Dieckmann, Elena und Cheeseman, Christopher. „Low-temperature thermal insulation materials with high impact resistance made from feather-fibres“. In: *Materials Letters: X* 6 (2020). PII: S2590150820300028, S. 100039. ISSN: 25901508. DOI: 10.1016/j.mblux.2020.100039.