



Fachbericht
ILK-B-2-19-1913a
08.01.2020
Seitenzahl 24

Energetischer Vergleich und Kostenvergleich zwischen überdachter Eislauffläche und Eissporthalle in Dachau

Auftraggeber:
Große Kreisstadt Dachau Abt. 5.0 Stadtbauamt

Dipl.-Ing. (FH) R. Paatzsch



Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	3
2 Berechnung des Energiebedarfs	4
2.1 Energiebedarf Heizung Funktionsräume	4
2.2 Energiebedarf Heizung Hallendach	5
2.3 Heizenergiebedarf Frischluft	6
2.4 Gesamter Heizenergiebedarf Zuluft	7
2.5 Energiebedarf Lüftung	7
2.6 Energiebedarf Kälteerzeugung	8
2.6.1 Konvektiver Wärmeübergang und Strahlungsaustausch	8
2.6.2 Wärmeeintrag über Erdreich	10
2.6.3 Wärmeeintrag durch Reifbildung	10
2.6.4 Wärmeeintrag durch Eispflege	11
2.6.5 Wärmeeintrag durch Beleuchtung und Personen	11
2.6.6 Mittlere Kälteleistung	12
2.6.7 Energiebedarf Kälteerzeugung	13
2.7 Gesamtenergiebedarf direkte Kälteerzeugung	15
2.8 Gesamtenergiebedarf indirekte Kälteerzeugung über Solesystem	15
3 Berechnung der Kosten	17
3.1 Verbrauchskosten direkte Kälteerzeugung	17
3.1.1 Überdachte Eissportanlage - direkte Kälteerzeugung	18
3.1.2 Geschlossene Eissporthalle - direkte Kälteerzeugung	19
3.2 Investitionskosten	19
4 Berechnung der CO₂-Emissionen	21
5 Zusammenfassung	22
Literaturverzeichnis	24

1 Aufgabenstellung

In Dachau soll eine neue Eissportanlage gebaut werden. Hierzu braucht die Verwaltung Unterstützung bei der Entscheidungsfindung, ob eine überdachte oder eine geschlossene Eisfläche gebaut werden soll. Es ist ein Vergleich zwischen einer überdachten Eislauffläche und einer Eissporthalle notwendig. Es sollen Vergleiche hinsichtlich Energieverbrauch und Kosten durchgeführt werden. Grundlage der Planung ist die Eissporthalle in Burgau, da sich die Stadt Dachau diese Eissportanlage als Referenzanlage bereits angeschaut hat. Die Referenzanlage soll von der Ausstattung als Vergleich herangezogen werden.

Der Flächenverbrauch wird für beide Varianten als gleich vorausgesetzt. Die Ermittlung der Investitionskosten erfolgt als Kostenrahmen über BKI-Kennwerte. Als Vergleichsobjekte dienen Sport- und Mehrzweckhallen. Weiterhin werden die Kostenkennwerte für Eissporthallen aus der Konzeptstudie (2017) vom Ingenieurbüro Möller + Meyer Gotha GmbH verwendet. Sämtliche Kostenkennwerte werden auf das Jahr 2021 bezogen. Die Verbrauchskosten werden aus dem zuvor ermittelten Energiebedarf ermittelt. Der Heizenergiebedarf der Funktionsräume wird für beide Varianten mit $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ gleich angenommen. Der Energiebedarf für die Kälteerzeugung und Klimatisierung wird berechnet. Die Berechnung erfolgt auf Grundlage von Richtwerten (DIN 18036 und VDI 2075). Als Alternative soll die Ausführung der Anlage als Soleanlage (indirektes System) mit Vor- und Nachteilen betrachtet werden.

2 Berechnung des Energiebedarfs

2.1 Energiebedarf Heizung Funktionsräume

Der Heizenergiebedarf der Funktionsräume wird mit 50 kWh/(m²·a) angesetzt. Dies gilt sowohl für die geschlossene Eissporthalle als auch für die überdachte Eissportanlage. Daraus ergibt sich ein Heizenergiebedarf von 38.480 kWh/a. In der folgenden Tabelle sind die Berechnungsergebnisse der einzelnen Räume abgebildet.

Tabelle 1 Heizenergiebedarf Funktionsräume

EG			
Bezeichnung	Fläche	berücksichtigt?	Heizenergiebedarf
Toilette öffentlich	63,23 m ²	ja	3161,5 kWh/a
WW-Speicher	12,05 m ²	nein	0,0 kWh/a
Trafo	7,50 m ²	nein	0,0 kWh/a
Schaltanl.-MSP	8,13 m ²	nein	0,0 kWh/a
Toilette Schiri/Train.	6,55 m ²	ja	327,5 kWh/a
Sani	10,92 m ²	ja	546,0 kWh/a
Schiri/Trainer 1	10,71 m ²	ja	535,5 kWh/a
Schiri/Trainer 2	10,71 m ²	ja	535,5 kWh/a
Schiri/Trainer 3	10,58 m ²	ja	529,0 kWh/a
Spieler 1	56,14 m ²	ja	2807,0 kWh/a
WC 1	8,40 m ²	ja	420,0 kWh/a
Flur 1	4,55 m ²	ja	227,5 kWh/a
DU 1	13,72 m ²	ja	686,0 kWh/a
Spieler 2	56,14 m ²	ja	2807,0 kWh/a
Spieler 3	56,14 m ²	ja	2807,0 kWh/a
WC 2	8,40 m ²	ja	420,0 kWh/a
Flur 2	4,55 m ²	ja	227,5 kWh/a
DU 2	13,72 m ²	ja	686,0 kWh/a
Heim	72,18 m ²	ja	3609,0 kWh/a
Ger.-H.	5,52 m ²	ja	276,0 kWh/a
Trocken.-H.	12,47 m ²	ja	623,5 kWh/a
Foyer	144,11 m ²	nein	0,0 kWh/a
Vorr. Kasse	27,66 m ²	ja	1383,0 kWh/a
Kasse	9,87 m ²	ja	493,5 kWh/a
Lager/Schleifen	12,58 m ²	ja	629,0 kWh/a
Kiosk/Verleih	22,56 m ²	ja	1128,0 kWh/a
Lager	17,25 m ²	ja	862,5 kWh/a
Werkstatt/Lager Eismeister	27,88 m ²	ja	1394,0 kWh/a
Eismaschine	47,53 m ²	ja	2376,5 kWh/a
Zwischensumme	761,75 m ²		29498,0 kWh/a
1. OG			
Bezeichnung	Fläche	berücksichtigt?	Heizenergiebedarf
Technik Kälte	29,39 m ²	nein	0,0 kWh/a
Technik Lüftung	139,55 m ²	nein	0,0 kWh/a
Technik Elektro	37,69 m ²	nein	0,0 kWh/a
Bereich Wärmerraum Verein	179,65 m ²	ja	8982,5 kWh/a
Zwischensumme	386,28 m ²		8982,5 kWh/a
Gesamt-Heizenergiebedarf			38480,5 kWh/a

Der Raum für die Eismaschine wurde vereinfachend auch mit 50 kWh/(m²·a) berücksichtigt. Der Heizenergiebedarf ist aber geringer, da die erforderliche Innentemperatur 5°C entsprechend VDI 2075 Tab. 16 beträgt.

Der Heizenergiebedarf der Funktionsräume wird aus dem Abwärmepotenzial der Kälteerzeugung gedeckt. Zur Nutzbarmachung ist der Einsatz einer Wärmepumpe

erforderlich, die das erforderliche Temperaturniveau des Heizwassers zur Verfügung stellt. Aufgrund der höheren Temperaturen der Abwärme kann die Wärmepumpe mit einer vorteilhaft hohen Wärmequellentemperatur betrieben werden. Dies sorgt für gute Jahresarbeitszahlen und zusätzlich ist die Trinkwarmwasserbereitstellung über die Wärmepumpe möglich. Für die Variante „geschlossene Eissporthalle“ wird eine Jahresarbeitszahl von 5,2 für die Wärmepumpe angesetzt, die Wärmequellentemperatur beträgt 20...25°C. Daraus ergibt sich ein Elektroenergiebedarf von ca. 7.400 kWh/a zur Deckung des Heizenergiebedarfs. Für die überdachte Eissportanlage wird eine Jahresarbeitszahl von 4,4 abgeschätzt, bei einer Wärmequellentemperatur von 12...17°C. Der Elektroenergiebedarf liegt bei 8.746 kWh/a. Die unterschiedlichen Jahresarbeitszahlen ergeben sich aus unterschiedlichen Temperaturniveaus der Wärmequelle, die wiederum von der Kondensationstemperatur der Kältemaschine abhängen. Nicht enthalten in den Berechnungen sind die erforderliche Energiemenge zur Trinkwassererwärmung und die Pumpenergie zur Umwälzung des Heizwassers.

2.2 Energiebedarf Heizung Hallendach

Bedingt durch die höhere Wärmeabstrahlung der Decke zur Eisfläche, ist die Oberflächentemperatur der Decke geringer als die der übrigen Umschließungsflächen. Deshalb ist hier eine Taupunktunterschreitung durch Zuführung von erwärmter Luft und ggf. Entfeuchtung zu verhindern. Bei einer Halleninrentemperatur von 12°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65% beträgt die Taupunkttemperatur ca. 5,6°C. Es muss durch eine raumluftechnische Anlage der Hallendecke so viel Heizwärme zugeführt werden, dass eine Taupunktunterschreitung ausgeschlossen ist. Als minimale Oberflächentemperatur wird für die folgenden Betrachtungen vereinfachend die Hallenlufttemperatur von 12°C gewählt. Der U-Wert für die Dachkonstruktion wird entsprechend der EnEV 2014 für Nichtwohngebäude mit 0,20 W/(m²·K) angesetzt. Für die überschlägige Ermittlung der Transmissionswärmeverluste Q_T der Hallendecke wurde vereinfachend eine Fläche von 2.957 m² ermittelt. Dies entspricht der Erdgeschossfläche der Achsen A-H und 1-12 der bereitgestellten Unterlagen für das Eisstadion Burgau. Zur Berechnung der Strahlungswärmeverluste der Hallendecke an die Eisoberfläche wird mit der Eisfläche von 1.800 m² gerechnet. Der Strahlungskoeffizient ergibt sich nach VDI 2075 Anhang A zu 2,05 W/(m²·K⁴) bei einem Emissionsgrad von 0,36. Bei einer Eisoberflächentemperatur von -5°C ergibt sich die Strahlungswärmeleistung Q_S von der Decke zur Eisfläche mit ca. 53 kW. Insgesamt sind über die raumluftechnische Anlage zwischen 55 und 60 kW Wärmeleistung im Hallendachbereich zuzuführen. Für die Berechnung des Heizenergiebedarfs wurde die mittlere Außenlufttemperatur des jeweiligen Monats verwendet. Diese wurde aus den aufgezeichneten Monatswerten des DWD der Wetterstation München-Flughafen für die Jahre 2014 bis 2018 ermittelt. Die Verwendung der aktuellen

Temperaturdaten berücksichtigt die Temperaturanstiege in den letzten Jahren. In der folgenden Tabelle sind die Berechnungsergebnisse abgebildet. Es ergibt sich ein Gesamtheizenergiebedarf von 291.823 kWh/a. Der wesentlich größere Anteil dieses Bedarfs wird als Strahlungswärmelast in der Eisfläche wirksam und muss über die Kälteanlage wieder abgeführt werden. Deshalb ist es empfehlenswert, die Abwärme der Kälteanlage für die Erwärmung der Zuluft zu verwenden.

Tabelle 2 Heizenergiebedarf Hallendach

Monat	Stunden	Außenlufttemperatur	Q _T	Q _S	Q _G	Heizenergiebedarf
Januar	744	0,6°C	6,7 kW	53,1 kW	59,8 kW	44513,0 kWh
Februar	672	1,2°C	6,4 kW	53,1 kW	59,5 kW	39966,8 kWh
März	744	5,2°C	4,0 kW	53,1 kW	57,1 kW	42489,3 kWh
April	720	9,6°C	1,4 kW	53,1 kW	54,5 kW	39245,4 kWh
Oktober	744	9,5°C	1,5 kW	53,1 kW	54,6 kW	40597,5 kWh
November	720	4,9°C	4,2 kW	53,1 kW	57,3 kW	41246,4 kWh
Dezember	744	2,3°C	5,7 kW	53,1 kW	58,8 kW	43765,1 kWh
Gesamt-Heizenergiebedarf						291823,4 kWh/a

2.3 Heizenergiebedarf Frischluft

Für die Berechnung des Heizenergiebedarfs zur Erwärmung des Frischluftanteils der Eissporthalle, des Tribünenbereichs und des Foyers über eine raumluftechnische Anlage, wurde eine Zulufttemperatur von 17°C angesetzt. Durch eine höhere Zulufttemperatur gegenüber der Raumlufthtemperatur sollen die Wärmeverluste über die vertikalen Außenbauteile kompensiert werden. Es wird von einer Betriebszeit der Anlage von 16 h/d ausgegangen. Der gesamte Luftvolumenstrom wird mit 49.387 m³/h abgeschätzt (s. folgende Tabelle). Es wurde von einer mittleren Hallenhöhe von 8,64 m ausgegangen.

Tabelle 3 Parameter für RLT-Anlage

Bezeichnung	Zulufttemperatur	Luftwechselrate	Volumen
Eissporthalle	17°C	2	15552,0 m ³
Tribüne	17°C	4	3325,5 m ³
Foyer	17°C	4	1245,1 m ³
Gesamtluftvolumenstrom			49387 m³/h

Daraus lässt sich der Heizenergiebedarf mit 696.384 kWh/a ermitteln (s. folgende Tabelle). Die Werte für den absoluten Wasserdampfgehalt wurden mit Hilfe von Meteonorm Version 6.1 für den Standort München ermittelt. Sie werden u. a. bei der Berechnung der erforderlichen Kälteleistung durch Bereifung für die überdachte Eissportanlage benötigt. Eine Entfeuchtung der Luft wurde in den Berechnungen nicht berücksichtigt.

Tabelle 4 Heizenergiebedarf Frischluft

Monat	Stunden	Außenlufttemperatur	Wasserdampfgehalt	Q _G	Heizenergiebedarf
Januar	496	0,6°C	2,79 g/kg	275,5 kW	136668,2 kWh
Februar	448	1,2°C	3,14 g/kg	265,5 kW	118937,5 kWh
März	496	5,2°C	4,15 g/kg	198,3 kW	98373,8 kWh
April	480	9,6°C	5,13 g/kg	124,4 kW	59720,3 kWh
Oktober	496	9,5°C	5,68 g/kg	126,1 kW	62554,2 kWh
November	480	4,9°C	3,82 g/kg	203,4 kW	97612,1 kWh
Dezember	496	2,3°C	3,25 g/kg	247,0 kW	122518,0 kWh
Gesamt-Heizenergiebedarf					696384,0 kWh/a

2.4 Gesamter Heizenergiebedarf Zuluft

Der gesamte Heizenergiebedarf für die Erwärmung der Zuluft der RLT-Anlage beträgt ca. 988.207 kWh/a. Die Deckung kann über die Abwärme der Kälteanlage und über eine Wärmerückgewinnung in der RLT-Anlage erfolgen. Die verfügbare Abwärme aus der Kälteanlage beträgt schätzungsweise 1.328.338 kWh/a und ergibt sich aus dem ermittelten Kältebedarf und der erforderlichen Antriebsenergie der Verdichter des direkten Kältesystems.

2.5 Energiebedarf Lüftung

Der Anteil für die Lüftung des Maschinenraums der Kälteanlage und ggf. der Sanitärräume wird in den Betrachtungen nicht berücksichtigt, da dieser für beide Varianten vereinfachend als gleich angenommen wird. Die Lüftungsanlage für die Frischluftversorgung im Tribünenbereich und Foyer muss einen Volumenstrom von ca. 18.300 m³/h fördern. Der Druckverlust wird mit 348 Pa und die elektrische Leistungsaufnahme des Ventilators mit ca. 3,9 kW abgeschätzt. Für die Geschwindigkeit in den Luftleitungen wurde ein Wert von 6 m/s angesetzt. Daraus ergibt sich ein Elektroenergiebedarf von 13.321 kWh/a bei einer angenommenen Betriebszeit von 16 h/d.

Tabelle 5 Berechnungsparameter für RLT-Anlage Tribüne und Foyer

Auslegungsdaten Ventilator	
Luftvolumenstrom	18283 m ³ /h
Δp Gesamt	348 Pa
Wirkungsgrad Gesamt	45%
elektrische Leistung	3,9 kW
Betriebszeit der Anlage	16 h/d
Energiebedarf	13321,4 kWh/a

Für die Versorgung im Bereich der Eisfläche und des Hallendaches wird ein Volumenstrom von ca. 31.100 m³/h aus der Luftwechselrate entsprechend Tabelle 3 ermittelt. Die überschlägige Berechnung der Druckverluste ergab einen Wert von 399 Pa bei einer Luftgeschwindigkeit von 6 m/s. Der elektrische Leistungsbedarf des Ventilators beträgt ca. 7,7 kW. Bei einer angenommenen Betriebszeit von 24 h/d (Beheizung Hallendach durchgängig erforderlich) ergibt sich ein Elektroenergiebedarf von 38.980 kWh/a.

Tabelle 6 Berechnungsparameter für RLT-Anlage Hallenbereich

Auslegungsdaten Ventilator	
Luftvolumenstrom	31104 m ³ /h
Δp Gesamt	399 Pa
Wirkungsgrad Gesamt	45%
elektrische Leistung	7,7 kW
Betriebszeit der Anlage	24 h/d
Energiebedarf	38980,0 kWh/a

Insgesamt wird für die Ventilatoren der Lüftungsanlage der geschlossenen Eissporthalle ein Elektroenergiebedarf von 52.301 kWh/a abgeschätzt.

2.6 Energiebedarf Kälteerzeugung

Zur Ermittlung der Kälteleistung wurden folgende Einzelgrößen berücksichtigt.

1. Konvektiver Wärmeeintrag über angrenzende Luftschicht
2. Wärmeeintrag durch Strahlungsaustausch mit anderen Umschließungsflächen
3. Wärmeeintrag durch diffuse Sonneneinstrahlung für überdachte Eissportanlage
4. Wärmeeintrag über Erdreich
5. Wärmeeintrag durch Reifbildung
6. Wärmeeintrag durch Eispflege
7. Wärmeeintrag durch Beleuchtung
8. Wärmeeintrag durch Personen

2.6.1 Konvektiver Wärmeübergang und Strahlungsaustausch

Die Berechnung des konvektiven Wärmeeintrags über die angrenzende Luftschicht erfolgte über den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten an der Eisoberfläche (1.800 m²). Hierbei ist die Luftgeschwindigkeit ein entscheidender Faktor. Für die geschlossene Eissporthalle sind die Luftgeschwindigkeiten geringer. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient kann entsprechend VDI Wärmetatlas für einen abwärts gerichteten Wärmestrom bei Mischkonvektion berechnet werden. Dabei wurde für die geschlossene Eissporthalle zwischen Tagbetrieb mit Publikumsverkehr und Nachtbetrieb ohne Publikumsverkehr unterschieden. Für die geschlossene Eissporthalle ergibt sich für eine Luftgeschwindigkeit von 0,1 m/s (ohne Publikumsverkehr) ein Wert von 0,75 W/(m²·K). Bei Eislaufbetrieb sind die Luftgeschwindigkeiten jedoch größer. Es wird von einem Wert von 0,4 m/s ausgegangen. Demensprechend erhöht sich auch der konvektive Wärmeübergangskoeffizient auf 1,95 W/(m²·K). Bedingt durch noch größere Luftgeschwindigkeiten an Außenbauteilen ergibt sich für diese ein deutlich höherer konvektiver Wärmeübergang. Um dies bei der offenen Eissportanlage zu berücksichtigen, wurde für die Luftgeschwindigkeit der Mittelwert der Klimazone 13 nach DIN 4710 Ausgabe 2003 mit 1,7 m/s angesetzt. Der konvektive Wärmeübergang ergibt sich zu 5,79 W/(m²·K).

Zur Berechnung der Wärmestrahlung von sichtbaren Umschließungsflächen, müssen deren Emissionsgrade berücksichtigt werden. Da der Großteil der Strahlungslast von der Decke herrührt, ist hier auf einen besonders niedrigen Emissionsgrad zu achten. Es wird deshalb für die Berechnungen ein Wert von 0,36 angesetzt. Die vertikalen Wände werden mit einem Emissionsgrad von 0,90 berücksichtigt. Die folgende Tabelle zeigt die einzelnen Flächen und deren Emissionsgrade.

Tabelle 7 Umschließungsflächen und Emissionsgrade

Bauteil	Fläche	Emissionsgrad
Wand klein	698 m ²	0,9
Wand groß	1266 m ²	0,9
Decke	2957 m ²	0,36
Eis	1800 m ²	0,965
Wichtung	4921 m ²	0,606

Der Emissionsgrad zwischen der Eisfläche 1 und einer im Strahlungsaustausch stehenden Wand 2 wurde wie folgt ermittelt.

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (1)$$

Aus den so ermittelten Emissionsgraden zwischen Eisfläche und den einzelnen Bauteilen wurde der flächengewichtete Emissionsgrad zwischen der Eisfläche und den übrigen Umschließungsflächen mit $\varepsilon_{E,W} = 0,606$ berechnet. Entsprechend DIN EN ISO 6946:2008-04 Anhang A ergibt sich der Wärmeübergangskoeffizient für den Strahlungsaustausch nach folgender Formel,

$$\alpha_S = \varepsilon_{E,W} \cdot 4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} W / (m^2 \cdot K^4) \cdot T_m^3 \quad (2)$$

mit T_m als der Mitteltemperatur zwischen Eisoberfläche und Lufttemperatur. Die Eisoberflächentemperatur wurde mit -5°C angesetzt. Für die Berechnung der überdachten Eissportanlage wurde mit dem gleichen gewichteten Emissionsgrad von 0,606 gerechnet, da auch hier der Strahlungsanteil der Decke dominiert. Jedoch muss für die Berechnung der überdachten Eissportanlage zusätzlich die Strahlungslast der diffusen Sonnenstrahlung in Abhängigkeit des Monats und der Tageszeit berücksichtigt werden. Für die Ermittlung der direkten Einstrahlung auf einen Teil der Eisfläche ist der Aufwand zum jetzigen Zeitpunkt zu groß. Wieviel von der Sonnenstrahlung durch die Eisfläche absorbiert wird hängt vom sogenannten Albedo-Wert ab (Reflexionsgrad). Der Reflexionsgrad kann theoretisch einen Wert zwischen 0 (keine Reflexion) und 1 (komplette Reflexion) annehmen. Wasser weist zum Beispiel einen Reflexionsgrad von 0,1 auf, während strahlend weißes Eis – mit einem Wert

von 0,8 – wesentlich mehr Sonnenlicht zurückwirft (Quelle: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/erde/atmosphaere/klimaforschung/eisalbedo/>). Bei verschmutzter Eisfläche (Staubschicht) und/oder mit einem Wasserfilm benetzter Eisoberfläche kann der Reflexionsgrad stark abnehmen, bis hin zum Wert von Wasser. Um dies zu berücksichtigen, wurde für die Berechnung der Diffusstrahlung ein Reflexionsgrad von 0,6 angesetzt. D.h., die Diffusstrahlung wird zu 40% von der Eisoberfläche absorbiert ($a = 1 - 0,6$). Die in folgender Tabelle dargestellten Werte wurden für die Berechnung verwendet. Der Anteil der Diffusstrahlung an der Kälteleistung für die überdachte Eissportanlage wird noch gezeigt. Der Wärmeübergangskoeffizient für die Strahlung der überdachten Eissportanlage in folgender Tabelle stellt einen Mittelwert dar. Für die Berechnungen wurde jedoch der für den jeweiligen Monat mit der mittleren Außenlufttemperatur berechnete Wert verwendet. Die Werte liegen in einem Bereich von 2,74...2,87 W/(m²·K).

Tabelle 8 Wärmeübergangskoeffizienten

	geschlossene Eissporthalle		überdachte Eissportanlage
	Nacht	Tag	
Temperatur der an die Eissportanlage angrenzenden Luft	8°C	12°C	Außenluft
Luftgeschwindigkeit	0,1 m/s	0,3 m/s	1,7 m/s
Wärmeübergangskoeffizient konvektiv	0,75 W/(m ² ·K)	1,95 W/(m ² ·K)	5,79 W/(m ² ·K)
Wärmeübergangskoeffizient strahlend	2,85 W/(m ² ·K)	2,91 W/(m ² ·K)	2,80 W/(m ² ·K)
Wärmeübergangskoeffizient gesamt	3,60 W/(m ² ·K)	4,86 W/(m ² ·K)	8,59 W/(m ² ·K)
Stunden	12 h/d	12 h/d	24 h/d

2.6.2 Wärmeeintrag über Erdreich

Der Wärmeeintrag über das Erdreich ergab sich mit ca. 6,4 kW für eine angrenzende Erdreichtemperatur von 5°C und der Temperatur der Kälteschicht mit -12°C (entspricht Verdampfungstemperatur des Kältemittels). Für das indirekte Kältesystem wurden -18°C angesetzt. Der Wärmeleitwiderstand ergibt sich aus 0,1 m Dämmung mit 0,03 W/(m·K) und 1,0 m Kiesschicht mit 0,70 W/(m·K).

2.6.3 Wärmeeintrag durch Reifbildung

Zur Ermittlung des auf der Eisoberfläche auskondensierenden und gefrierenden Wassers wird von einem stationären Stofftransport ausgegangen. Hierzu wurde der Stoffübergangskoeffizient β aus der Lewisschen Beziehung ermittelt,

$$\beta = \frac{\alpha_K}{c_p \cdot \rho} \cdot Le^{m-1} \quad (3)$$

mit den Stoffwerten spezifische Wärmekapazität c_p und Dichte ρ für Luft. Die dimensionslose Lewis-Zahl Le kann für Wasserdampf in Luft in guter Näherung mit 0,87 angesetzt werden. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis a/D , der Temperaturleitfähigkeit a und dem

Diffusionskoeffizienten D . Der Stoffübergangskoeffizient ist ein Maß für den je Flächeneinheit übertragenen Volumenstrom (m/s entspricht $m^3/(s \cdot m^2)$). Zur Berechnung der ausfallenden Wassermenge je Flächeneinheit wurde in Anlehnung an die Filmtheorie folgende Gleichung verwendet,

$$\dot{m} = \frac{p}{R \cdot T} \cdot \beta \cdot (x_o - x_L) \quad (4)$$

mit den Luftparametern Druck p , Temperatur T in Kelvin und der Gaskonstante R , sowie der Differenz des Wasserdampfgehalts der Luft an der Eisoberfläche (Sättigungszustand) x_o und der Umgebung x_L . Für die geschlossene Eissporthalle wurde von einem mittleren Luftzustand von 12°C und 50% relativer Luftfeuchte für die Betriebszeit ausgegangen. Daraus lassen sich für den Tagbetrieb $14 \text{ g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ und für den Nachtbetrieb $5 \text{ g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ermitteln. Für die überdachte Eissportanlage fallen die Werte wie beim konvektiven Wärmeübergangskoeffizient höher aus, aufgrund der höheren Luftbewegung an der Eisoberfläche. Die Werte liegen je nach Außenluftzustand zwischen $7 \dots 72 \text{ g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$. Bei der Berechnung der durch die Kälteanlage abzuführenden Wärme muss die Energiemenge für die Phasenumwandlungsvorgänge von Wasserdampf zu Wasser und von Wasser zu Eis berücksichtigt werden. Den größten Anteil liefert dabei die Kondensationswärme, da die Verdampfungsenthalpie Δh_o des Wassers mit ca. 2.500 kJ/kg sehr groß ist. Die Erstarrungsenthalpie beträgt $333,7 \text{ kJ/kg}$. Der Anteil der Abkühlung des Kondensats von Taupunkttemperatur bis zum Gefrierpunkt Δh_s und anschließend bis auf -5°C ist hingegen gering, wurde jedoch berücksichtigt. Die Berechnung des Anteils der Reifbildung ergibt sich demnach aus,

$$\dot{Q} = [\Delta h_o + \Delta h_s + 333,7 \text{ kJ/kg} + 2,06 \cdot (0^\circ\text{C} - (-5^\circ\text{C}))] \cdot \dot{m} \cdot A \quad (5)$$

mit einer Eisfläche A von 1.800 m^2 .

2.6.4 Wärmeeintrag durch Eispflege

Für die Eispflege wurde ein täglicher Wasserverbrauch von 7.500 l/d angesetzt. Für eine Ausgangstemperatur des Wassers von 40°C ergibt sich eine erforderliche Kälteleistung von $88,8 \text{ kW}$, um das Wasser bis zum Gefrierpunkt abzukühlen, die Phasenumwandlung zu vollziehen und das Eis bis auf -5°C weiter abzukühlen.

2.6.5 Wärmeeintrag durch Beleuchtung und Personen

Die inneren strahlenden und konvektiven Lasten wurden für die Beleuchtung mit 22 kW und für Personen mit 10 kW pauschal berücksichtigt.

2.6.6 Mittlere Kälteleistung

Aus den zuvor gemachten Ausführungen lässt sich die mittlere Kälteleistung wie folgt abschätzen.

Tabelle 9 mittlere Kälteleistung geschlossene Eissporthalle

Kälteleistung	Nacht	Tag
Konvektion	17,6 kW	59,7 kW
Strahlung	66,7 kW	89,1 kW
Erdreich	6,4 kW	6,4 kW
Reifbildung	7,8 kW	20,3 kW
Eispflege	0,0 kW	88,8 kW
Beleuchtung	0,0 kW	22,0 kW
Personen	0,0 kW	10,0 kW
Gesamt	98,4 kW	296,3 kW

Tabelle 10 mittlere Kälteleistung überdachte Eissportanlage

Monat	Januar		Februar		März		April		Oktober		November		Dezember	
	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag
Kälteleistung [kW]														
Konvektion	58,4	58,4	64,6	64,6	106,3	106,3	152,2	152,2	151,1	151,1	103,2	103,2	76,1	76,1
Strahlung	27,6	27,6	30,6	30,6	51,5	51,5	75,5	75,5	75,0	75,0	49,9	49,9	36,3	36,3
Diffusstrahlung	0,0	33,7	0,0	50,0	0,0	74,4	0,0	99,5	0,0	50,2	0,0	32,5	0,0	25,1
Erdreich	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
Reifbildung	10,1	10,1	21,8	21,8	54,8	54,8	85,8	85,8	103,6	103,6	44,0	44,0	25,4	25,4
Eispflege	0,0	88,8	0,0	88,8	0,0	88,8	0,0	88,8	0,0	88,8	0,0	88,8	0,0	88,8
Beleuchtung	0,0	22,0	0,0	22,0	0,0	22,0	0,0	22,0	0,0	22,0	0,0	22,0	0,0	22,0
Personen	0,0	10,0	0,0	10,0	0,0	10,0	0,0	10,0	0,0	10,0	0,0	10,0	0,0	10,0
Gesamt	102,5	257,0	123,5	294,3	219,0	414,2	319,9	540,2	336,1	507,2	203,5	356,7	144,2	290,1

Die Werte für Konvektion, Strahlung und Reifbildung unterscheiden sich bei der überdachten Eissportanlage zwischen Tag- und Nachtbetrieb nicht, da diese mit der mittleren Luftgeschwindigkeit von 1,7 m/s bzw. der mittleren Außenlufttemperatur des Monats ermittelt wurden. Es ist zu erkennen, dass die mittlere Kälteleistung der überdachten Eissportanlage deutlich größer sein kann als für die geschlossene Eissporthalle (s. folgendes Diagramm). Selbst in den Monaten Dezember und Februar wird sie aufgrund der vom DWD für die Jahre 2014 bis 2018 aufgezeichneten höheren Außenlufttemperaturen im Mittel höher abgeschätzt. Dies ist weiterhin bedingt durch den größeren Anteil der Konvektion, der zusätzlichen Diffusstrahlung und den größeren Kondensatmengen auf der Eisoberfläche. Der daraus resultierende Kältebedarf wird für die überdachte Eissportanlage mit 49% höher abgeschätzt.

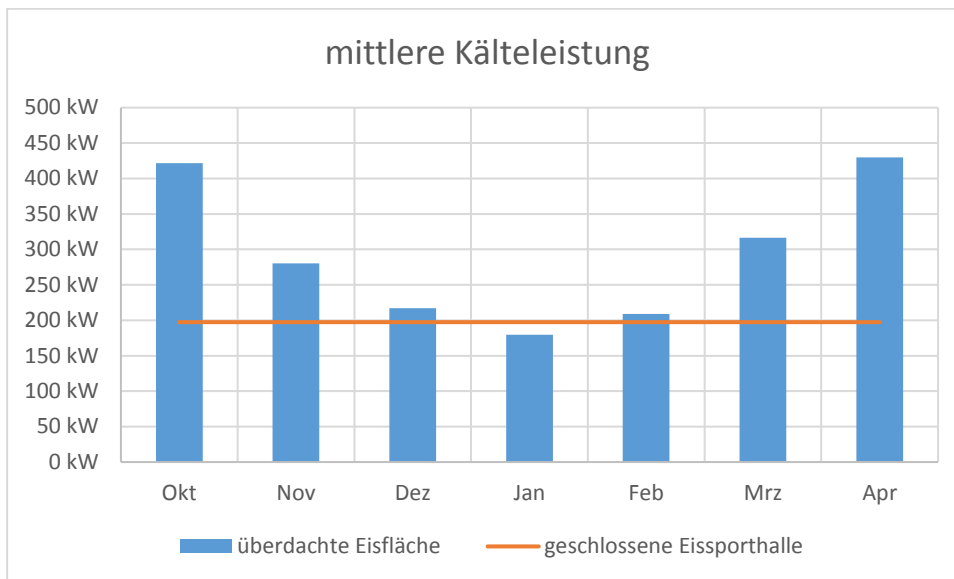


Diagramm 1: mittlere Kälteleistung

2.6.7 Energiebedarf Kälteerzeugung

Aus den ermittelten Werten der Kälteleistung ergibt sich folgender Kälte- und Elektroenergiebedarf für die Kälteerzeugung. Die Verdampfungstemperatur wurde einheitlich mit -12°C gewählt. Für den Monat Oktober wurde zusätzlich der Energieaufwand für die einmalige Eiserzeugung mit 8.683 kWh berücksichtigt. Dieser Wert ergibt sich aus der Abkühlung des Wassers ($1.800 \times 0,04 \text{ m}^3$) von 20°C auf den Gefrierpunkt, der Phasenumwandlung ($333,7 \text{ kJ/kg}$) und der weiteren Abkühlung auf eine Kerntemperatur des Eises von -8°C .

Tabelle 11 Kälte- und Elektroenergiebedarf geschlossene Eissporthalle

Monat	Stunden	Kältebedarf	Elektroenergiebedarf
Januar	744	146835,7 kWh	45746,9 kWh
Februar	672	132625,8 kWh	41319,8 kWh
März	744	146835,7 kWh	45746,9 kWh
April	720	142099,1 kWh	44271,2 kWh
Oktober	744	155518,4 kWh	48386,0 kWh
November	720	142099,1 kWh	44271,2 kWh
Dezember	744	146835,7 kWh	45746,9 kWh
Gesamtenergiebedarf		1012849,5 kWh/a	315489,0 kWh/a

Die Kondensationstemperatur wurde für die geschlossene Eissporthalle mit 30°C und die Kälteleistungszahl mit 3,29 angesetzt. Die Kondensationstemperatur wurde höher gewählt als für die überdachte Eissportanlage, da die Abwärme zur Wärmeerzeugung des Zuluftstroms und der Funktionsräume verwendet werden soll und eine gute Übereinstimmung zwischen Abwärmeangebot und Wärmebedarf besteht. Während der Zuluftstrom direkt aus der Abwärme auf eine Temperatur von 17°C erwärmt werden kann, ist für die Funktionsräume eine zusätzliche Wärmepumpe vorzusehen. Diese hebt die in einem Warmwasserspeicher zwischengespeicherte Abwärme der Kälteanlage auf das erforderliche Nutztemperaturniveau.

Da die Wärmequelle mit einer Temperatur von etwa 20...25°C zur Verfügung steht, kann die Wärmepumpe auch für die Trinkwassererwärmung genutzt werden. Zur Auskopplung der Abwärme aus dem Kälteprozess ist ein Zwischenkreis vorzusehen. Der Elektroenergiebedarf für die erforderliche Umwälzpumpe wird mit 7.560 kWh/a abgeschätzt. Da die Kälteerzeugung auch dann laufen muss, wenn keine oder eine geringere Wärmeanforderung auf der Heizseite besteht, wird ein „Notkühler“ erforderlich sein, der das Mehr an Abwärme an die Außenluft abführt. Der Elektroenergiebedarf für den „Notkühler“ wird mit 9.621 kWh/a abgeschätzt. Insgesamt ergibt sich für die Kälteerzeugung und Abwärmeauskopplung der geschlossenen Eissporthalle ein Elektroenergiebedarf von 332.670 kWh/a.

Tabelle 12 Kälte- und Elektroenergiebedarf überdachte Eissportanlage

Monat	Stunden	Außenlufttemperatur	mittlere Kälteleistung	Kältebedarf	Elektroenergiebedarf
Januar	744	0,6°C	179,8 kW	133741,0 kWh	31442,8 kWh
Februar	672	1,2°C	208,9 kW	140381,2 kWh	32840,5 kWh
März	744	5,2°C	316,6 kW	235563,9 kWh	54531,9 kWh
April	720	9,6°C	430,0 kW	309615,3 kWh	71287,6 kWh
Oktober	744	9,5°C	421,6 kW	322384,6 kWh	74219,1 kWh
November	720	4,9°C	280,1 kW	201677,2 kWh	46811,8 kWh
Dezember	744	2,3°C	217,1 kW	161558,4 kWh	37750,6 kWh
Gesamtenergiebedarf				1504921,7 kWh/a	348884,1 kWh/a

Es wird abgeschätzt, dass der Kältebedarf der überdachten Eissportanlage ca. 49 % höher ist, als bei der geschlossenen Eissporthalle. Die wesentliche Ursache liegt in der höheren Sonneneinstrahlung (nur diffus berücksichtigt) und der höheren Luftgeschwindigkeit, die einen höheren konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten und Stoffübergangskoeffizienten bewirkt. Die mittlere Kondensationstemperatur wurde mit 20°C und die Kälteleistungszahl mit 4,41 angesetzt. Die Kondensationstemperatur sollte für diese Ausführungsvariante keinesfalls konstant gehalten, sondern in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur gleitend gefahren werden. Bei der überdachten Eissportanlage variieren die an die Eisoberfläche angrenzenden Lufttemperaturen jahreszeitabhängig, während sie für die geschlossene Eissporthalle als konstant betrachtet werden können und lediglich zwischen dem Tag- und Nachtbetrieb variieren. Bei Ausführung der überdachten Eissportanlage ist davon auszugehen, dass die Abwärmeleistung des Kälteprozesses i.d.R. deutlich größer sein wird als die erforderliche Heizleistung der Funktionsräume. Deshalb muss als Wärmesenke ein Verflüssiger gegen Außenluft vorgesehen werden. In der folgenden Tabelle ist der abgeschätzte Elektroenergiebedarf der Verflüssigerventilatoren dargestellt. Als Basisdaten für den Verflüssiger wurden folgende Werte angesetzt.

Leistung: 970 kW
 Elektrische Leistung: 55,8 kW
 Volumenstrom: 381.256 m³/h

Tabelle 13 Elektroenergiebedarf Verflüssigerventilatoren überdachte Eissportanlage

Monat	Stunden	Außenlufttemperatur	Volumenstrom	Leistung	Ventilator	Elektroenergiebedarf
Januar	744	0,6°C	95314 m ³ /h	220,5 kW	0,9 kW	648,8 kWh
Februar	672	1,2°C	95314 m ³ /h	256,3 kW	0,9 kW	586,0 kWh
März	744	5,2°C	95314 m ³ /h	388,4 kW	0,9 kW	648,8 kWh
April	720	9,6°C	204057 m ³ /h	527,5 kW	8,6 kW	6161,0 kWh
Oktober	744	9,5°C	197313 m ³ /h	517,3 kW	7,7 kW	5755,7 kWh
November	720	4,9°C	95314 m ³ /h	343,6 kW	0,9 kW	627,9 kWh
Dezember	744	2,3°C	95314 m ³ /h	266,4 kW	0,9 kW	648,8 kWh
Gesamtenergiebedarf						15077,0 kWh/a

Für die überdachte Eissportanlage ergibt sich ein Elektroenergiebedarf für die Kälteerzeugung von 363.961 kWh/a. Das heißt, dass für die geschlossene Eissporthalle ein ca. 9% geringerer Elektroenergiebedarf zur Kälteerzeugung zu erwarten ist. Wie sensibel dieser Wert mit den mittleren Außenlufttemperaturen zusammenhängt, zeigt eine Vergleichsrechnung mit mittleren monatlichen Außenlufttemperaturen nach DIN 4710 Ausgabe 2003 für Klimazone 13 – Passau. Die Datenbasis der Temperaturen dieser Norm geht auf die Jahre 1961 bis 1990 zurück. Die Werte berücksichtigen also nicht die aktuell höheren Durchschnittstemperaturen. Mit den geringeren Monatsmitteltemperaturen nach DIN 4710 ergibt sich für die überdachte Eissportanlage ein geringerer Elektroenergiebedarf von 324.434 kWh/a, während er für die geschlossene Eissporthalle gleich bleibt. Im Umkehrschluss bedeutet das, da zukünftig die Außenlufttemperaturen und evtl. auch die mittleren Windgeschwindigkeiten weiter ansteigen werden, wird für die überdachte Eissportanlage der Kälte- und Elektroenergiebedarf ebenfalls ansteigen.

2.7 Gesamtenergiebedarf direkte Kälteerzeugung

In der folgenden Tabelle sind die ermittelten Werte übersichtlich zusammengefasst. Der für die betrachteten Bereiche berechnete Elektroenergiebedarf beträgt für die überdachte Eissportanlage 372.707 kWh/a und für die geschlossene Eissporthalle 392.371 kWh/a. Durch die erforderliche RLT-Anlage wird für die geschlossene Eissporthalle insgesamt ein höherer Elektroenergiebedarf von ca. 5% abgeschätzt.

Tabelle 14 Elektroenergiebedarf direkte Kälteerzeugung

Elektroenergiebedarf für	überdachte Eissportanlage	geschlossene Eissporthalle
Wärmepumpe Heizung Funktionsräume	8746 kWh/a	7400 kWh/a
Ventilatoren RLT-Anlage	0 kWh/a	52301 kWh/a
direktes Kältesystem	363961 kWh/a	332670 kWh/a
Gesamt (direktes Kältesystem)	372707 kWh/a	392371 kWh/a

2.8 Gesamtenergiebedarf indirekte Kälteerzeugung über Solesystem

Die Anforderung an die Eisoberflächentemperatur bleibt unverändert bei -5°C. Im Gegensatz zur direkten Kälteerzeugung wird das Rohrsystem in der Eissportanlage nicht vom Kältemittel Ammoniak sondern von Sole durchflossen. Dies macht einen zusätzlichen Wärmeübertrager

zwischen Kältekreis und Solekreis erforderlich. Die Ammoniakpumpen entfallen, jedoch sind zusätzliche Sole-Pumpen erforderlich. Der große Nachteil des indirekten Systems besteht in einer deutlich tieferen Verdampfungstemperatur, die zu schlechteren Kälteleistungszahlen und damit einem höheren Elektroenergiebedarf für die Kälteerzeugung führt. Die Verdampfungstemperatur sinkt von -12°C auf -18°C . Der Kältebedarf erhöht sich gegenüber den vorherigen Betrachtungen dadurch ein wenig, da der Wärmeeintrag aus dem Erdreich bei unveränderter Bauweise leicht ansteigt.

Es wird darauf verzichtet, die einzelnen Berechnungsergebnisse für das indirekte Kältesystem darzustellen, da hier lediglich der Vergleich zwischen einem direkten und indirekten Kältesystem durchgeführt werden soll und die Umsetzung dieser Variante aus energetischer Sicht nicht zu empfehlen ist. Der Elektroenergiebedarf für die Kälteerzeugung ist für das indirekte Kältesystem deutlich höher. Für die überdachte Eissportanlage beträgt der Mehrbedarf 31% und für die geschlossene Eissporthalle 26%. Insgesamt steigt der Elektroenergiebedarf der überdachten Eissportanlage auf 486.138 kWh (ca. 30%) und der geschlossenen Eissporthalle auf 477.937 kWh/a (22%).

Tabelle 15 Elektroenergiebedarf indirekte Kälteerzeugung

Elektroenergiebedarf für	überdachte Eissportanlage	geschlossene Eissporthalle
Wärmepumpe Heizung Funktionsräume	8746 kWh/a	7400 kWh/a
Ventilatoren RLT-Anlage	0 kWh/a	52301 kWh/a
indirektes Kältesystem	477393 kWh/a	418235 kWh/a
Gesamt (indirektes Kältesystem)	486138 kWh/a	477937 kWh/a

Anmerkung: Die dargestellten Zahlenwerte umfassen nicht den gesamt zu erwartenden Energiebedarf, da zum einen die Sonneneinstrahlung nicht komplett erfasst wurde und zum anderen wurde weder die Beleuchtung noch sonstiges erforderliches technisches Equipment hinsichtlich des Elektroenergiebedarfs berücksichtigt.

3 Berechnung der Kosten

3.1 Verbrauchskosten direkte Kälteerzeugung

Von den Stadtwerken Dachau wurden dem Auftraggeber die in den folgenden Tabellen dargestellten Preisbestandteile für die Zusammensetzung des Elektroenergiepreises zur Verfügung gestellt. Daraus lassen sich die Jahreskosten berechnen. Zur Ermittlung des Leistungspreises muss die zu erwartende Jahreshöchstleistung bekannt sein, welche zum jetzigen Zeitpunkt nur abgeschätzt werden kann. Dafür wird die maximale Kälteleistung der Kälteanlage mit Hilfe der DIN 18036 abgeschätzt. Für geschlossene Eissporthallen im Winterbetrieb empfiehlt diese 400...600 kW und für überdachte Eissportanlagen im Winterbetrieb 700...900 kW. Diese Werte beziehen sich auf eine Standard-Eissportanlage mit 1.800 m². Für die Ermittlung der elektrischen Leistung werden der jeweilige Mittelwert und die entsprechende Leistungszahl verwendet.

$$\text{geschlossene Eissporthalle: } P_{el} = \frac{500kW}{3,29} \approx 152kW$$

$$\text{überdachte Eissportanlage: } P_{el} = \frac{800kW}{4,41} \approx 181kW$$

Die folgende Tabelle zeigt die elektrischen Leistungswerte der einzelnen Komponenten.

Tabelle 16 elektrische Leistungswerte Komponenten

	Überdachte Eissportanlage	Geschlossene Eissporthalle
Kälteanlage	181 kW	152 kW
Wärmepumpe 25 kW Heizleistung	6 kW	5 kW
NH ₃ -Pumpe	2 kW	2 kW
Verflüssigerventilatoren	56 kW	30 kW
Pumpe Wärmeauskopplung	0 kW	5 kW
Ventilatoren RLT-Anlage	0 kW	12 kW
Gesamt	245 kW	206 kW

Daraus lassen sich für die überdachte Eissportanlage Brutto-Jahreskosten von 102.582 € errechnen. Für die geschlossene Eissporthalle ergeben sich 102.951 €. Es wird also abgeschätzt, dass die jährlichen Verbrauchskosten in etwa die gleiche Größenordnung haben werden.

3.1.1 Überdachte Eissportanlage - direkte Kälteerzeugung

Jahresverbrauch	372.707 kWh		
Jahreshöchstleistung	245 kW		
Benutzungsstunden	1.521 Stunden		
		Preis je Einheit	Nettobetrag in €
1. Energiepreis	6,31 Ct/kWh		23.517,81 €
2. Netz			25.702,03 €
Netznutzung-Arbeitspreis	1,39 Ct/kWh		5.180,63 €
Netznutzung-Leistungspreis	80,92 €/kW p. a.		19.825,40 €
Messstellenbetrieb	237,00 €/Jahr		237,00 €
Kosten für Wandler	339,00 €/Jahr		339,00 €
Kommunikationsanschluss des Netzbetreibers	120,00 €/Jahr		120,00 €
3. Fiskal			
Konzessionsabgabe)*	0,11 Ct/kWh		409,98 €
EEG-Umlage	6,756 Ct/kWh		25.180,08 €
KWK-Umlage bis 1 Mio. kWh	0,226 Ct/kWh		842,32 €
§19-StromNEV-Umlage bis 1 Mio. kWh	0,358 Ct/kWh		1.334,29 €
§19-StromNEV-Umlage > 1 Mio. kWh	0,05 Ct/kWh		
§18 AblV	0,007 Ct/kWh		26,09 €
Offshore-Umlage bis 1 Mio. kWh	0,416 Ct/kWh		1.550,46 €
Stromsteuer	2,05 Ct/kWh		7.640,49 €
Jahreskosten netto:			86.203,55 €
Durchschnittspreis netto:			23,13 Ct/kWh
Jahreskosten brutto:			102.582,23 €
Durchschnittspreis brutto:			27,52 Ct/kWh

3.1.2 Geschlossene Eissporthalle - direkte Kälteerzeugung

Jahresverbrauch	392.371 kWh	
Jahreshöchstleistung	206 kW	
Benutzungsstunden	1.905 Stunden	
	Preis je Einheit	Nettobetrag in €
1. Energiepreis	6,31 Ct/kWh	24.758,61 €
2. Netz		22.819,48 €
Netznutzung-Arbeitspreis	1,39 Ct/kWh	5.453,96 €
Netznutzung-Leistungspreis	80,92 €/kW p. a.	16.669,52 €
Messstellenbetrieb	237,00 €/Jahr	237,00 €
Kosten für Wandler	339,00 €/Jahr	339,00 €
Kommunikationsanschluss des Netzbetreibers	120,00 €/Jahr	120,00 €
3. Fiskal		38.934,97 €
Konzessionsabgabe)*	0,11 Ct/kWh	431,61 €
EEG-Umlage	6,756 Ct/kWh	26.508,58 €
KWK-Umlage bis 1 Mio. kWh	0,226 Ct/kWh	886,76 €
§19-StromNEV-Umlage bis 1 Mio. kWh	0,358 Ct/kWh	1.404,69 €
§19-StromNEV-Umlage > 1 Mio. kWh	0,05 Ct/kWh	
§18 AblV	0,007 Ct/kWh	27,47 €
Offshore-Umlage bis 1 Mio. kWh	0,416 Ct/kWh	1.632,26 €
Stromsteuer	2,05 Ct/kWh	8.043,61 €
Jahreskosten netto:		86.513,06 €
Durchschnittspreis netto:		22,05 Ct/kWh
Jahreskosten brutto:		102.950,54 €
Durchschnittspreis brutto:		26,24 Ct/kWh

3.2 Investitionskosten

Die Investitionskosten wurden mit Hilfe von Referenzobjekten und BKI-Kostenkennwerten für Sport- und Mehrzweckhallen Stand 2018 berechnet. Für die Valorisierung der Referenzobjekte auf das Jahr 2021 wurde eine jährliche Preissteigerung von 2,49% angesetzt. Dieser Wert wurde aus den Kosten der Referenzobjekte aufgetragen über den Baujahren ermittelt. Er entspricht dem Mittelwert des Anstiegs der spezifischen Kosten bezogen auf die Bruttogeschossfläche BGF und bezogen auf den Bruttorauminhalt BRI. Die Referenzobjekte wurden entsprechend Abstimmung mit dem AG aus einer Konzeptstudie des Ingenieurbüro Möller + Meyer Gotha GmbH (2017) entnommen.

Tabelle 17 Kosten KG 300, 400, 500 und 700 für Referenzobjekte für Baujahr und 2021

Referenzobjekte	Baujahr	BRI	BGF	Kosten brutto - Baujahr		Kosten brutto - 2021	
Eissporthalle Ilmenau	2006	36000 m ³	5200 m ²	7.616.000 €	212 €/m ³	307 €/m ³	11.052.000 €
Eisarena Bremerhaven	2011	74956 m ³	13500 m ²	20.336.862 €	271 €/m ³	347 €/m ³	26.009.732 €
EgeTransArena Bietigheim	2012	93567 m ³	11715 m ²	24.852.555 €	266 €/m ³	332 €/m ³	31.064.244 €
Eisarena Weißwasser	2013	54500 m ³	7890 m ²	15.320.869 €	281 €/m ³	342 €/m ³	18.639.000 €
Eisstadion Burgau	2016	32000 m ³	4030 m ²	7.735.000 €	242 €/m ³	274 €/m ³	8.768.000 €

Die mittleren spezifischen Kosten der in Tabelle 17 abgebildeten Referenzobjekte betragen für das Jahr 2021 ca. 320 €/m³. Zur Ermittlung der Bruttogeschossfläche und des Bruttorauminhalts für die Eissporthalle in Dachau wurden die verfügbaren Unterlagen des Eisstadions Burgau verwendet. Um eine inklusionsgerechte Ausführung der Eissporthalle Dachau zu berücksichtigen, wurde eine größere Bruttogeschossfläche von 4.600 m² angesetzt. Der Bruttorauminhalt wird dementsprechend auch größer und mit 36.500 m³ abgeschätzt. Folgende Kosten wurden für die Kostengruppen 200, 300, 400, 500 und 700 ermittelt. Die Kosten beinhalten eine behindertengerechte Ausstattung mit einem Mehraufwand von 350.000 € netto.

Tabelle 18 Kostenrahmen für geschlossene Eissporthalle für 2021

Kostengruppe	Bezeichnung	Kosten
200	Herrichten und Erschließen	215.446 €
300	Bauwerk - Baukonstruktionen	7.198.098 €
400	Bauwerk - Technische Anlagen	2.200.761 €
500	Außenanlagen	773.395 €
700	Baunebenkosten	1.857.750 €
	Gesamtkosten (brutto)	12.245.451 €

Für die überdachte Eissportanlage wurde als kostenwirksamer Unterschied im Bereich der KG 300 - Baukonstruktion die fehlenden Außenwände berücksichtigt. Im Vergleich zur geschlossenen Eissporthalle entfallen 50% der Außenwände. Die Außenwände der Funktionsräume und im Eingangsbereich/Foyer werden auch für die überdachte Eissportanlage berechnet. Für KG 400 - Technische Anlagen entfällt die Lufttechnische Anlage für die Frischluftversorgung und Hallenbeheizung. Die Investitionskosten für die Kälteanlage sind höher, da eine größere Kälteleistung erforderlich ist. Im Bereich der Außenanlagen wurden keine Unterschiede berücksichtigt. Die Baunebenkosten fallen geringer aus.

Tabelle 19 Kostenrahmen für überdachte Eissportanlage für 2021

Kostengruppe	Bezeichnung	Kosten
200	Herrichten und Erschließen	215.446 €
300	Bauwerk - Baukonstruktionen	5.953.824 €
400	Bauwerk - Technische Anlagen	1.954.816 €
500	Außenanlagen	773.395 €
700	Baunebenkosten	1.563.527 €
	Gesamtkosten (brutto)	10.461.008 €

Insgesamt werden ca. 1,78 Mio. € Kostendifferenz für die Investition abgeschätzt. Dies entspricht ca. 15% geringere Kosten für die überdachte Eissportanlage.

4 Berechnung der CO₂-Emissionen

Aus den ermittelten Elektroenergieverbräuchen der betrachteten Konzepte ergeben sich die folgenden CO₂-Emissionen. Die Emissionen wurden mit dem Strommix der Stadtwerke Dachau berechnet. Auf deren Internetseite kann für den SWD Mix ein Wert für die CO₂-Emissionen von 218 g/kWh entnommen werden.

Tabelle 20 CO₂-Emissionen

Variante	CO ₂ -Emissionen
überdachte Eissportanlage - direkte Kälteanlage	81,3 t/a
geschlossene Eissporthalle - direkte Kälteanlage	85,5 t/a
überdachte Eissportanlage - indirekte Kälteanlage	106,0 t/a
geschlossene Eissporthalle - indirekte Kälteanlage	104,2 t/a

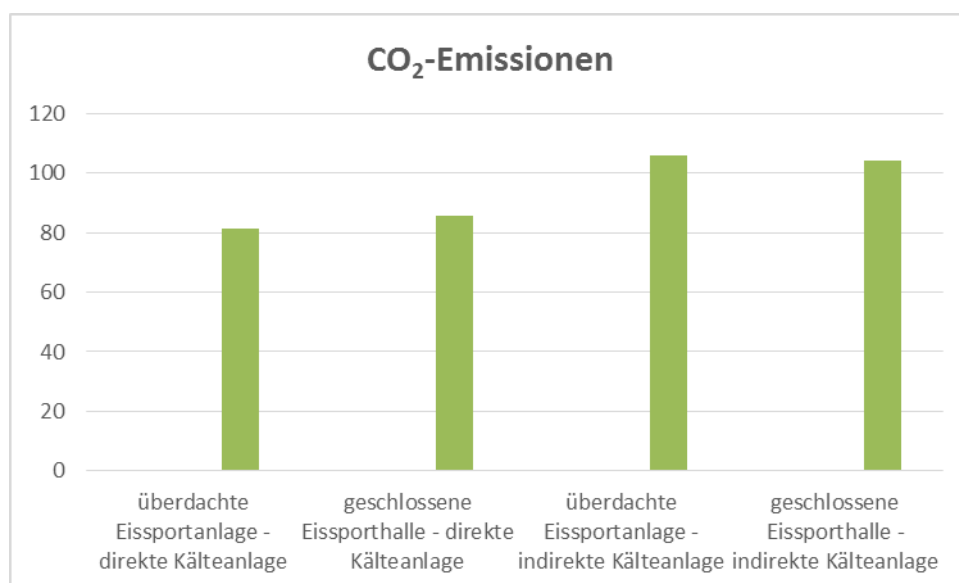


Diagramm 2: CO₂-Emissionen

Die geringsten Emissionen werden für die überdachte Eissportanlage mit direkter Kälteerzeugung erwartet. Dieser Wert ist jedoch abhängig von den herrschenden Witterungsbedingungen. Da zu erwarten ist, dass die künftigen Jahre eher höhere Außenlufttemperaturen aufweisen werden, wird auch der Energiebedarf steigen. In welche Richtung sich die CO₂-Emissionen entwickeln, hängt nicht nur vom Elektroenergieverbrauch ab, sondern auch vom zukünftig weiter ansteigenden Anteil der regenerativen Energien an der Elektroenergieerzeugung. Aus dieser Sicht ist davon auszugehen, dass die CO₂-Emissionen zukünftig sinken.

5 Zusammenfassung

Die Untersuchungen ergaben für die überdachte Eissportanlage einen deutlich höheren Kältebedarf und einen ca. 9% höheren Elektroenergiebedarf für die Kälteerzeugung im Vergleich zu einer geschlossenen Eissporthalle. Wesentliche Ursache sind die äußeren Witterungsbedingungen, wie höhere Luftfeuchtigkeit, höhere Luft- bzw. Windgeschwindigkeit über der Eisfläche und die Sonneneinstrahlung. Die höhere Luftfeuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit führen zu einem größeren Kondensatanfall, verbunden mit einer verstärkten Reifbildung. Das bewirkt einen größeren Aufwand bei der Eispflege, welcher in den Berechnungen jedoch als gleich angesetzt wurde. Weiterhin bewirken die höheren Wind- bzw. Luftgeschwindigkeiten einen deutlich größeren konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten, welcher bis auf das 7-fache und mehr im Vergleich zur geschlossenen Eissporthalle ansteigen kann. Der dadurch bedingte höhere konvektive Wärmeeintrag in die Eisfläche kann nur teilweise durch die geringeren Außenlufttemperaturen kompensiert werden. I.d.R. ist der konvektive Wärmeeintrag für die überdachte Eissportanlage höher. Berücksichtigt man zukünftig noch ansteigende Lufttemperaturen, wird sich dieser Sachverhalt noch spürbarer auswirken. Setzt man z.B. eine um 0,5 K höhere Außenlufttemperatur im Monatsmittel an, so wird für die Kälteerzeugung in der Zeit von Oktober bis April ein zusätzlicher Elektroenergiebedarf von 3,5% abgeschätzt. Ein weiterer wesentlicher Nachteil der überdachten Eissportanlage ist die höhere Sonneneinstrahlung. Diese führt ebenfalls zu einem erhöhten Kältebedarf und damit zu einem höheren Elektroenergieverbrauch. Dieser steigt noch weiter an, je verschmutzter die Eisfläche ist, da der Reflexionsgrad abnimmt und mehr Sonnenstrahlung absorbiert wird. Das heißt, dass auch hier eine erhöhte Eispflege erforderlich ist, da der Verschmutzungsgrad der Eisfläche einer überdachten Eissportanlage gewiss größer ist. In den Berechnungen wurde nur der Anteil der diffusen Sonneneinstrahlung berücksichtigt. Die Ermittlung des Kältebedarfs der direkten Sonneneinstrahlung auf die Eisfläche der überdachten Anlage und des Anteils der Sonneneinstrahlung durch die transparenten Bauteile der geschlossenen Eissporthalle war im Rahmen der Aufgabenstellung zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich. Dementsprechend umfasst der in Abschnitt 2 ermittelte Elektroenergiebedarf nicht den gesamten zu erwartenden Energiebedarf. Zusätzlich sind außerdem noch die Beleuchtung und sonstige Elektroenergieverbraucher zu berücksichtigen, die den Elektroenergiebedarf weiter ansteigen lassen. Das bedeutet also, dass die in Abschnitt 3 ermittelten Verbrauchskosten nicht die gesamten Elektroenergiekosten darstellen. Diese werden abhängig von der Ausführung der Beleuchtung und der sonstigen Elektroenergieverbraucher höher ausfallen.

Aus Sicht der gewonnenen Erkenntnisse wird die Umsetzung einer geschlossenen Eissporthalle empfohlen. Der Einfluss der äußeren Witterungsbedingungen auf den

Elektroenergiebedarf bleibt somit begrenzt, der Aufwand für die Eispflege ist geringer und man ist unabhängiger von der zukünftigen Klimaentwicklung. Zudem sind schlechte Witterungsbedingungen kein Hinderungsgrund für einen Besuch der Eissporthalle, was eine konstantere Auslastung der Eissportanlage verspricht.

Bei der Umsetzung der geschlossenen Eissporthalle muss bauseits sichergestellt werden, dass die Sonneneinstrahlung auf die Eisfläche so gering wie möglich bleibt und die Dachkonstruktion mit einem geringstmöglichen Emissionsgrad zur Eisfläche ausgeführt wird. Eine höhere Sonneneinstrahlung und ein höherer Emissionsgrad lassen den Elektroenergiebedarf deutlich ansteigen. Dies gilt auch für eine überdachte Eissportanlage.

Literaturverzeichnis

- [1] **VDI 2075**
Eissportanlagen Technische Gebäudeausrüstung
Juli 2003
- [2] **DIN 18036**
Eissportanlagen –
Anlagen für den Eissport mit Kunsteisflächen – Grundlagen für Planung und Bau
März 2010
- [3] **VDI Wärmeatlas**
Zehnte, bearbeitete und erweiterte Auflage
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
- [4] **DIN EN ISO 6946**
Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient –
Berechnungsverfahren (ISO 6946:2007)
April 2008
- [5] **DIN 4710**
Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz-
und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland
Januar 2003
- [6] **Deutscher Wetterdienst DWD**
Mittlere Monatstemperaturen für die Station München-Flughafen
2014 - 2018
- [7] **Konzeptstudie**
Eine neue inklusionsgerechte Sport- und Eissportfläche für Dachau
Ingenieurbüro Möller + Meyer Gotha GmbH Juli 2017
- [8] **Wärme- und Stoffübertragung**
H.D. Baehr; K. Stephan
5. Auflage
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
- [9] **BKI-Kostenkennwerte**
für Sport- und Mehrzweckhallen
Stand 2018