

Mit welchem minimalen Energiebedarf
für die Erstellung und den Unterhalt
der Strecke kann man die Langlauf-
Wettbewerbe auf dem Campus der Uni
Vaihingen auf Schnee stattfinden
lassen?

PlaNeT SimTech – Team ID: 250

10. März 2018

1. Zusammenfassung	3
2. Einführung	3
3. Hauptteil	3
3.1 Methode und Grundannahmen	3
3.2 Berechnung	4
3.2.1 Energiebedarf bei der erstmaligen Beschneidung der Piste	4
3.2.2 Energiebedarf für die Kühlung der Piste	6
3.2.3 Energiebedarf für die Präparierung der Piste	7
3.3 Resultate	7
3.4 Diskussionen	7
4. Schlussfolgerung	8
5. Literaturverzeichnis	9

1. Zusammenfassung

Die Antwort auf die im Titel gestellte Frage lautet:

Für die Erstellung und den Unterhalt der Strecke benötigen wir mindestens 212,8 GJ.

Für das Ergebnis haben wir die Energie für die Erstellung, den Unterhalt, und die Präparierung der Loipe abgeschätzt und addiert.

2. Einführung

Durch anhaltende Verlegungen sportlicher Großereignisse, werden die Winterspiele im Jahr 2026 im Sommer stattfinden. Um sich als Land Baden-Württemberg bewerben zu können, wird ein realisierbares Konzept benötigt, die Spiele auszuführen. Der Skilanglauf soll dabei auf dem Campus der Uni Vaihingen stattfinden. Dieses sportliche Großereignis geht jedoch mit immensem technischem Aufwand einher, dessen minimaler Energieverbrauch für Erstellung und Erhalt der Piste in diesem Bericht abgeschätzt werden soll.

3. Hauptteil

3.1 Methode und Grundannahmen

Die Dauer der Winterspiele haben wir, in Anlehnung an die diesjährigen Winterspiele, auf 18 Tage festgelegt [5], dabei soll der letzte Tag ein Sonntag sein, da der Sonntag uns für eine Siegerehrung am geeignetsten scheint. Als Monat erschien uns der August am geeignetsten, da die anderen beiden möglichen Sommermonate Juli und Juni entweder in Temperatur oder an Niederschlag extremer sind als der August [10] und wir hoffen, so ein verträgliches Mittelmaß zwischen Temperatur und Niederschlag gefunden zu haben. So ergibt sich für die Spiele ein Termin vom 13. August 2026 bis zum 30. August 2026. Eine Woche im Voraus wollen wir die Loipe für benötigte Trainingseinheiten der angereisten Teams zur Verfügung stellen und auch an den nicht für die Spiele genutzten Tagen zwischen den Wettbewerben soll die Piste für die Sportler als Trainingsort zur Verfügung stehen. Folglich befindet sich die Loipe für 25 Tage, vom 6. August bis 30. August 2026, in Betrieb.

Unsere Strecke stellen die den Campus umrundenden Straßen Pfaffenwaldring und Universitätsstraße dar, da hier durch Mitbenutzung der Grünstreifen eine nahezu durchgängige Pistenbreite von 10m gewährleistet werden kann und die Strecke mit ca. 2,5 km Länge [1] sich gut eignet, um die olympischen Langlaufdistanzen von 5km, 7,5km, 10km, 15km und 50km zu erreichen[2]. Die Schneehöhe der Loipe soll 30cm betragen, da dies in einer Webseite des deutschen Skiverbands als Pistenhöhe angegeben ist [3] und von unten durch ein Leitungssystem, ähnlich der Leitungen einer Bodenheizung, gefüllt mit Kühlmittel, gekühlt werden. Die Loipe soll mit Hilfe von Bäumen vollständig beschattet werden. Dies widerspricht nicht der vom Veranstalter gegebenen Vorgabe, das Rennen unter freiem Himmel abzuhalten und verringert den Energieverbrauch, da direkte Sonneinstrahlung auf den Schnee vermieden wird.

Das benötigte Wasser soll aus dem nahegelegenen Pfaffensee entnommen werden. Da wir keine Angaben zur Wassertemperatur des Pfaffensees gefunden haben, rechnen wir mit der Wassertemperatur des durch Stuttgart fließenden Neckars, der im August eine Temperatur von 14-24°C aufweist [4], im weiteren rechnen wir mit einer angenommenen Temperatur als Mittelwert der beiden Extremwerte: $\vartheta = (24^{\circ}\text{C} + 14^{\circ}\text{C}) / 2 = 19^{\circ}\text{C}$.

Die Oberflächentemperatur der Schneedecke versuchen wir auf -2°C zu halten, um auch bei kurzfristigen Schwankungen nicht direkt ein Schmelzen der Piste befürchten zu müssen.

Während der gesamten Berechnung gehen wir von konstantem, isobaren Druck aus.

Die Beschneigung der Loipe erfolgt durch Schneekanonen.

3.2 Berechnung

3.2.1 Energiebedarf bei der erstmaligen Beschneigung der Piste

Der Energiebedarf bei der erstmaligen Beschneigung besteht zu einem großen Teil aus der Energie, die benötigt wird, um das verwendete Wasser unter den Gefrierpunkt auf -2 °C zu kühlen:

Volumen des Schnees: $V = l \cdot b \cdot h = 2500\text{m} \cdot 10\text{m} \cdot 0,3\text{m} = 7.500\text{m}^3$

Benötigtes Wasser pro Kubikmeter Schnee: ca. 277,77 l/m³ [3]

Gesamt benötigtes Wasser: $V \cdot 277,77 \text{ l/m}^3 \approx 2,1 \text{ mio. l Wasser}$

Temperaturdifferenz, über die das Wasser gekühlt werden muss: $\Delta T = 19^{\circ}\text{C} - (-2^{\circ}\text{C}) = 21\text{K}$

Energie, die dem Wasser durch Kühlung entzogen werden muss:

$$Q_{\text{gesamt}} = Q_{\text{kühlung}} + Q_{\text{kristallisation}}$$

$$Q_{\text{kühlung}} = m \cdot c \cdot (\Delta T) = 2.100.000 \text{ kg} \cdot 4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot 21\text{K} = 184,426 \text{ GJ}$$

$$Q_{\text{kristallisation}} = m \cdot q_{\text{kristallisation}} \quad | \quad q_{\text{kristallisation}} = 5279,4 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad [7] [8]$$

$$Q_{\text{kristallisation}} = 2.100.000\text{kg} \cdot 5279,4 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \approx 11,1 \text{ GJ}$$

$$Q_{\text{gesamt}} = Q_{\text{kühlung}} + Q_{\text{kristallisation}} = 184,426 \text{ GJ} + 11,1 \text{ GJ} = 195,526 \text{ GJ}$$

Insgesamt müssen dem System beim Auftragen des Kunstschnees ungefähr 195,526 GJ an thermischer Energie entzogen werden.

Zusätzlich benötigen wir Energie, um die Wassermenge von 2,1 mio. l aus den umliegenden Seen zur Piste zu pumpen. Hierfür verwenden wir einen Pumpenwagen des THW [11].

Bei einer Pumpleistung von 15.000 l/min benötigen wir 140 Minuten (8400s) um das Wasser von den Seen zur Loipe zu befördern. Bei einer Leistung von 83kW ergibt dies eine Energie von:

$$E = 83\text{kW} \cdot 8400\text{s} = 697.200\text{kWs} = 697.200\text{kJ}$$

3.2.2 Energiebedarf für die Kühlung der Piste

Die Loipe muss nach Errichtung während der gesamten Betriebszeit von 25 Tagen gekühlt werden, damit der Schnee nicht abschmilzt. Wir gehen davon aus, dass die Luftschicht über der Piste durch den Schnee ebenfalls auf -2°C abkühlt. Durch Wind und Durchmischung der Luft ist anzunehmen, dass die Luft in 5m Höhe nicht mehr durch die Piste gekühlt wird und daher dort die durchschnittliche Temperatur von $19,5^{\circ}\text{C}$ im Schatten herrscht [9]. Diese Temperaturdifferenz führt zu einem Wärmestrom:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d}$$

λ : spezifische Wärmeleitfähigkeit, A: Fläche durch die Wärme strömt, d: Dicke des durchströmten Materials.

Oberfläche der Piste: $A = 2500\text{m} \cdot 10\text{m} = 25.000\text{m}^2$

Spezifische Wärmeleitfähigkeit von Luft: $\lambda = 0,0247 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$

Dicke der durchströmten Luftschicht: 5m

Temperaturdifferenz: $\Delta T = 21,5\text{K}$

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d} = 0,0247 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} \cdot 25.000\text{m}^2 \cdot 21,5\text{K} / 5\text{m} = 2655,25 \text{ W}$$

Dieser Wärmestrom ist innerhalb der gesamten Betriebszeit von 25 Tagen präsent.

Betriebszeit der Loipe in Sekunden: $t = 25 \cdot 24 \cdot 3600\text{s} = 2.160.000\text{s}$

Energie, die vom Eis während der gesamten Betriebszeit der Luft entzogen wird:

$$E = \dot{Q} \cdot t = 2655,25 \text{ W} \cdot 2.160.000\text{s} \approx 5,735 \text{ GJ}$$

Diese Energie muss wiederum als Kälteleistung durch die unter der Piste verlegten Rohre abgeführt werden.

3.2.3 Energiebedarf für die Präparierung der Piste

Bei der Präparierung der Piste, die nach jedem Tag stattfinden muss, verwenden wir eine Pistenraupe vom Typ PistenBully 600 E+ [6] mit einer Schilddbreite von etwas über 5m. Dieser Typ erschien uns besonders geeignet, da er, durch zusätzliche Verwendung eines Elektromotors neben dem Dieselmotor, einen geringeren Spritverbrauch verspricht, als vergleichbare Pistenraupen. Bei einer Breite der Piste von 10m muss die Pistenraupe zwei Runden fahren, also insgesamt 5km, um die gesamte Bahn zu präparieren. Diese Fahrt muss sie vor jedem Tag unternehmen, an dem die Piste benutzt werden soll, also insgesamt 25 Mal. Bei einer Geschwindigkeit von max. 20 km/h der Pistenraupe ergibt sich eine reine Fahrzeit von 15 min/Tag. Zusätzlich gehen wir von weiteren 10 Minuten Motorlaufzeit aus, die benötigt wird um den Motor warmzulaufen, aus der Garage zu fahren, zu manövrieren und nach der Aufbereitung der Piste wieder in die Garage zu fahren. Dies ergibt eine tägliche Gesamtmotorlaufzeit von 25 Minuten. Bei 25 Betriebstagen summiert sich dies auf 625 Betriebsminuten oder 37500 Sekunden. Multipliziert mit der Leistung von 295kW ergibt sich ein Gesamtenergieverbrauch von rund 11,1 GJ.

3.3 Resultate

Insgesamt muss dem System 195,526 GJ + 5,735 GJ also rund 201 GJ an thermischer Energie entzogen werden. Für Präparierung der Piste und Lieferung des verwendeten Wassers müssen 11,1 GJ +697.200 kJ oder rund 11,8 GJ aufgewendet werden.

3.4 Diskussionen

Leider wissen wir nicht, wie viel Energie wir aufwenden müssen, um dem System die thermische Energie von 201 GJ zu entziehen, da wir den Wirkungsgrad sowie Leistungsdaten aktueller Kühlsystem bei der Recherche nicht herausfinden konnten. Da wir es nie mit einem idealen System zu tun haben, können wir nicht von einem Wirkungsgrad von 100% ausgehen, sodass die aufgewendete Energie höher als die berechnete thermische Energie sein muss. Die 201 GJ sind somit das absolute Minimum. Die Energie die dabei für den Betrieb der Schneekanone nötig wäre, war nicht zu ermitteln.

Auch wäre es möglich gewesen, durch chemische Zusatzstoffe die Schmelztemperatur des Kunstschnees zu erhöhen, was in einem geringeren Energieaufwand resultiert hätte. Jedoch ist diese Methode in Anbetracht der Schädigung der Biosphäre nicht verantwortbar und zudem in Deutschland zumindest teilweise verboten.

Des Weiteren ist fraglich, ob die von uns angenommene Totalbeschattung der Piste durch Bäume tatsächlich umsetzbar wäre.

Leider mussten wir auch die Energie zum Bau der Infrastruktur der Loipe (z.B. Kühlsystem) vernachlässigen, da die Zeit nicht für eine hinreichende Abschätzung derselben ausgereicht hat.

Das Abschmelzen der Piste durch Regen war in der gegebenen Zeit ebenfalls nicht einzuschätzen, weshalb wir es nicht berücksichtigen konnten.

4. Schlussfolgerung

Trotz der absurd anmutenden Idee, eine Loipe im Sommer zu errichten, ist die benötigte Energie tatsächlich gering genug, ein solches Vorhaben durchzuführen. Beispielsweise wäre das Kernkraftwerk Neckarwestheim dazu in der Lage, die benötigte Energie bereitzustellen.

5. Literaturverzeichnis

[1] Länge der verwendeten Straßen sowie deren Breite:

<https://www.google.de/maps/dir/48.7432032,9.1039947/48.7507749,9.10943/@48.7469985,9.1083449,16.75z/data=!4m14!4m13!1m10!3m4!1m2!1d9.1091845!2d48.7453615!3s0x4799dc663d49bec5:0x589127c156d0b791!3m4!1m2!1d9.1104863!2d48.7469917!3s0x4799dc660a7cde6f:0xb176c8e4e3da54ca!1m0!3e2>

<https://www.google.de/maps/dir/48.7432032,9.1039947/48.7507749,9.10943/@48.7467513,9.1046335,16.5z/data=!4m9!4m8!1m5!3m4!1m2!1d9.1027338!2d48.7466015!3s0x4799dc695b7f0899:0x29bdd6251be14d6!1m0!3e2>

[2] Länge der Piste beim olympischen Skilanglauf:

<https://www.pyeongchang2018.com/en/sports/cross-country-skiing?pgdiv=A#Cross-Country>

[3] Höhe des Schnees auf der präparierten Piste sowie benötigtes Wasser:

https://www.deutscherskiverband.de/ueber_uns_umwelt_fragen_tech_n_de.print

[4] Wassertemperatur des Neckar: <https://www.wassertemperatur.info/europa/neckar>

[5] Dauer der Winterspiele 2018:

https://de.wikipedia.org/wiki/Olympische_Winterspiele_2018

[6] Verwendete Pistenraupe:

https://www.pistenbully.com/fileadmin/content_pistenbully/modul_8_download/Fahrzeuge/600_E_-_April_2016/technische-daten-600-eplus-de.pdf

[7] Formel zur Berechnung der Kristallisationsenergie:

https://books.google.de/books?id=Jl-1BgAAQBAJ&pg=PA16&lpg=PA16&dq=kristallisationsw%C3%A4rme+berechnen&source=bl&ots=vzZfQZ2_xb&sig=9QA5oCVAZQUIiABOBIjCU4SpyTZs&hl=de&sa=X&ved=0ahUKEwjA5pje0eHZAhUD6CwKH R6yAH0Q6AEIzjAF#v=onepage&q=kristallisationsw%C3%A4rme%20berechnen&f=false

(S. 16 unten)

[8] Quelle für die Berechnung von $q_{\text{kristallisation}}$:

<https://books.google.de/books?id=Okh9BwAAQBAJ&pg=PA247&lpg=PA247&dq=spezifische+Kristallisationsw%C3%A4rme+Wasser&source=bl&ots=EwxYB9PV5F&sig=YP-FoNifo2dmguMGLHrJiwP5ITM&hl=de&sa=X&ved=0ahUKEwiL1LyG0uHZAhUGhiwKHdqED0MQ6AEIRDAC#v=onepage&q=spezifische%20Kristallisationsw%C3%A4rme%20Wasser&f=false>

(S. 247 unten)

$q_{\text{kristallisation}}$ ergab sich durch Umstellen der Formel nach $q_{\text{kristallisation}}$ und Einsetzen der im Buch angeführten Werte ($E = 4,19 \cdot 10^4 \text{ J}$; $m_{\text{Eis}} = 0,126 \text{ kg}$).

[9] Durchschnittstemperatur im August von 1961 bis 2010:

<https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/monatswerte.asp?y=2017&m=8>

[10] Wetter und Klimadaten für Stuttgart:

<https://www.wetter.de/klima/europa/deutschland/stuttgart-s107390.html>

[11] Pumpenwagen des THW:

<https://dyndox.landkreis-augsburg.de/Dox.aspx?docid=b0a72c71-0b3d-496c-ae8b-e49925283348&orgid=63395895-1495-4de9-923a-2ab14e33206f>