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 510

10. März 2018

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung **3**

2 Einführung **3**

3 Hauptteil **3**

3.1 Grundidee 3

3.2 Modelierungsannahmen 4

3.3 Mathematische und Physikalische Methoden 6

3.4 Diskussion 12

4 Schlussfolgerung **13**

1 Zusammenfassung

Wir sind davon ausgegangen, dass 164 Milliarden Joule ist die Energie, die wir letzlich errechnet haben.

2 Einführung

Die Olympischen Spiele waren schon immer ein spektakuläres Ereignis. Die Wetterbedingungen spielen dabei immer eine wichtige Rolle, insbesondere bei den Winterspielen, für die man Schnee und Eis benötigt. Das Land Baden-Württemberg will sich nun auf die Olympischen Winterspiele 2026 bewerben, welche im Sommer stattfinden sollen. Problematisch ist dabei die Tatsache, dass der Wettbewerb im Sommer bei sommerlichen Temperaturen stattfinden soll. Trotzdem möchten das Land Baden-Württemberg unbedingt den Langlauf an der Uni Vaihingen stattfinden lassen. Nun soll bestimmt werden, wie groß der Energiebedarf für den Aufbau und den Erhalt der Strecke sein soll.

3 Hauptteil

3.1 Grundidee

Das wichtigste Problem, was einer guten Kühlung im Weg steht, ist die Sonneneinstrahlung. Wenn man diese vollständig und einfach manipulieren könnte, wären alle Probleme der Winterolympiade im Sommer gelöst. Allerdings lässt der momentane Stand der Forschung nur zu, das Wetter minimal und kleinräumig zu verändern. Die Idee der Wettermanipulation ist bei den Olympischen Spielen nicht neu; bereits 2008 bei den Olympischen Spielen in wurde Silberjodid in der Atmosphäre verteilt, um Regen während der Spiele zu verhindern. [3] Von diesem Beispiel und von dem 'Jahr ohne Sommer' 1816 inspiriert, in dem ein Vulkan ausgebrochen ist und durch seine Aschewolke die ganze Erde abgekühlt hat, ist unser erster Vorschlag, Vaihingen durch eine Manipulation der Atmosphäre abzukühlen. Dazu sollen Nanopartikel in der Atmospäre verteilt werden. Wenn die Temperaturen durch die Klimamanipulation gesenkt sind, kann die Stecke aufgebaut werden. Genutzt werden Wege am Vaihinger Unicampus und im anliegenden Wald. Um den Energieverbrauch weiter zu senken wird die Schneeschicht weiter isoliert. Es soll auch geprüft werden, ob es energetisch günstiger ist, Schnee im Winter zu machen und zu lagern oder Schnee aus kalten Regionen der Erde zu liefern.

3.2 Modelierungsannahmen

Für eine angemessene Modellierung muss zunächst geklärt werden, wie die Strecke genau aussehen soll. Die Strecke soll folgende Anforderungen erfüllen:

- möglichst viele Zuschauer sollen möglichst viel sehen können
- es soll auf dem Gelände der Uni Vaihingen untergebracht sein
- ferner stellt die Fédération International des Ski (FIS) weitere strenge Bedingungen, die eingehalten werden sollten
  - zwei seperate Runden mit je 5km, die sich zu einer Runde mit 10km verbinden lassen.
  - je ein drittel Ebene, Gefälle und Steigung (9-18 Prozent Gefälle und Steigung)
  - mind. 80 Höhenmeter Differenz
  - 9-12m Breite am Start (hier schwer zu realisieren)
  - 12m Breite bergauf
  - 9m Mindestbreite bei Massenstarts
  - 4m Mindesbreite an allen anderen Stellen
  - mind. 10cm Schneedicke

Da der Uni-Campus einen Austragungsort der besonderen Art bietet und die Spiele im Sommer stattfinden, verzichten wir aufgrund der geographischen Gegebenheiten auf die großen Steigungen. Das mindert auch das Risiko einer Überhitzung beim kraftintensiven Langlaufen und erfüllt zudem die Forderung der FIS nach einer naturnahen Strecke ohne größere Eingriffe in die Umwelt.

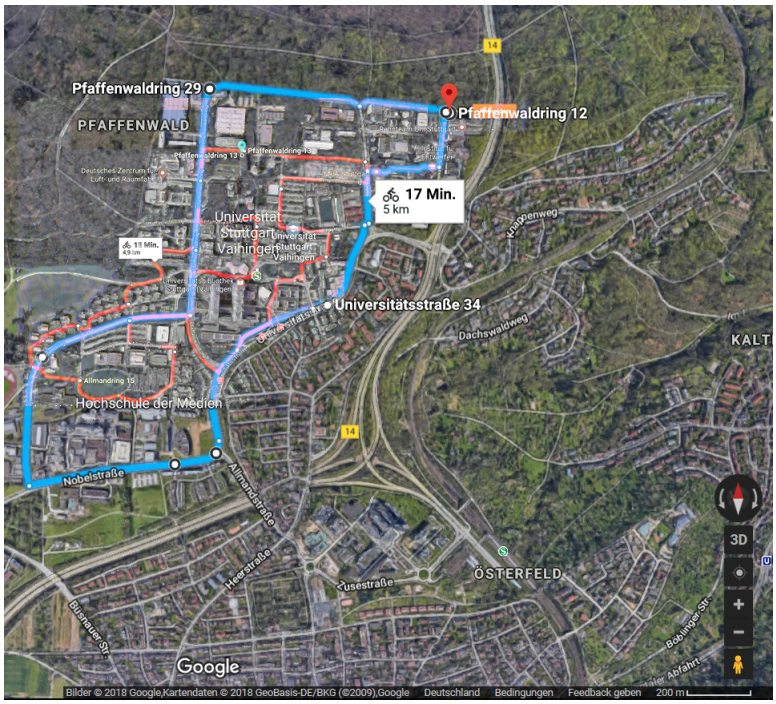

Abbildung 1: Die von uns erstellten Strecken mit je 5km Länge; Quelle: Google Maps

Die erste Kühlung, die wir uns ausgedacht haben, sieht vor, Schwefeldioxid in der Atmosphäre zu verteilen. Aus der Erfahrung vergangener Vulkanausbrüche ist bekannt, dass dieser Stoff in großen Mengen die gesamte Erde abkühlen kann. [5] Genaue Rechnungen sind leider nicht möglich, da hier die genaue Erfahrung fehlt. Wir treffen die Annahme, dass ein Flugzeug mit Schwefeldioxid beladen am Tag ausreicht, um das Mikroklima in Stuttgart um rund 5K abzukühlen.[5] Dabei sollte bereits etwa einem Monat vorher mit dem Verteilen begonnen werden, um bis zur Olympiade niedrige Temeperaturen zu erreichen. Um Energie zu sparen kann man Passagierflugzeuge dazu nutzten, die ohnehin fliegen, die Stoffe im Großraum Stuttgart zu verteilen. Auch wenn jedes Flugzeug dabei weniger transportieren kann, sollte durch die größere Menge an Flugzeugen dasselbe Ergebnis erzielt werden. Da Schwefel und Schwefeldioxid oft als Abfallprodukt in der Industrie anfallen, muss man keine weitere Energie zum Herstellen aufwenden[4]. Dadurch, dass die Stoffe in großer Höhe freigesetzt werden, sollten sie nicht weiter schädlich sein und sich durch Winde nach dem Event so verteilen, dass sie in einer unschädlichen Konzentration auf die Erde zurückkommen. So lässt sich quasi ohne Energieaufwand die Temperatur um 5K senken.
Unsere Schneebahn ist aufgebaut aus einer Schicht Stroh, das der Isolierung zum Boden dient, eine Plane, die zwischen dem Schnee und dem Stroh ist

und den Flüssigkeitstransfer verhindet.

3.3 Mathematische und Physikalische Methoden

Am Anfang müssen wir das Schneevolumen ermitteln. Durch die Breitenanforderungen und der Näherung der Fläche als Rechteck ergeben sich folgende Schneeoberflächen, die während der Wettkämpfe mindestens 10cm hoch beschneit werden müssen. Eine Strecke, die für Massenstarts tauglich ist, hat folgende Fläche:

$$A = b * l = (\frac{1}{3} * 12m + \frac{2}{3} * 9m) * 5000m = 50000m^2$$

Die andere Strecke, die nur die Mindestbreite von 4m hat, hat eine Fläche:

$$A = b * l = 4m * 5000m = 20000m^2$$

Addiert man die Flächen, so erhält man, dass konstant auf $70000m^2$ Schnee liegen muss. Mit der Hohe von 0,1m multipliziert erhält man ein Schneevolumen von $7000m^3$, was dauerhaft auf den Loipen sein muss.
Um mit den Berechnungen weitermachen zu können, müssen wir wissen, wie warm es im Sommer in Stuttgart ist. Dabei hilft ein Klimadiagramm:

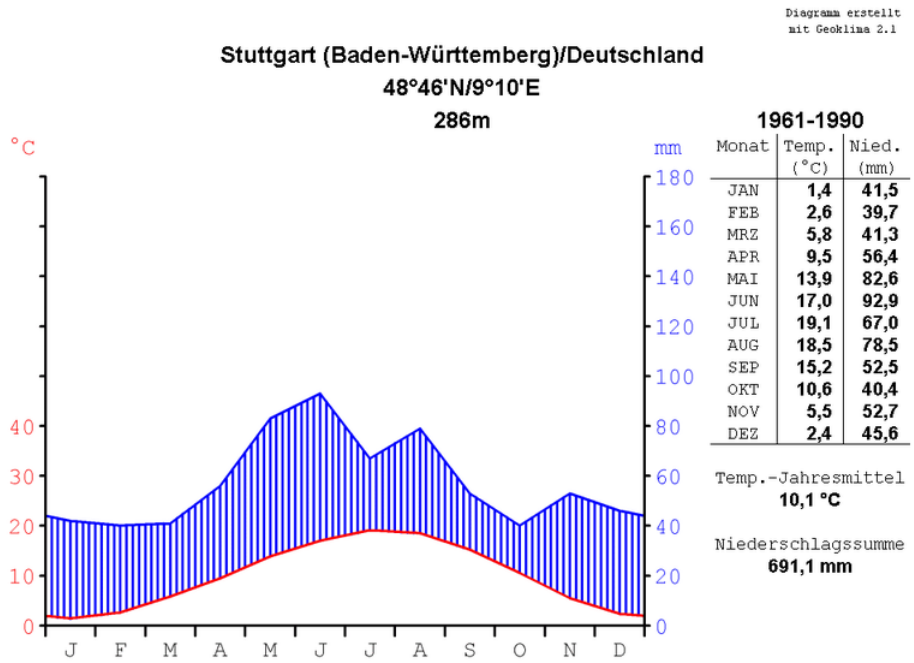

Abbildung 2: Ein Klimadiagramm von Stuttgart

Als niedrigste durchschnittliche Sommertemperatur ergeben sich die rund 15°C des Semptembers, der technisch gesehen noch zum Spätsommer zählt.

Mit dieser Temperatur werden wir weiterrechnen.
Ziehen wir die 5K Temperaturdifferenz ab, die wir in unseren Annahmen der Schwefeldioxidsonnenblockade zugesschreiben haben, erhalten wir eine Umgebungstemperatur von 10°C für unsere Winterspiele im Sommer.

Wir gehen von einer Schneedichte von $600\frac{kg}{m^3}$ aus, da unser Schnne verdichtet ist. [6] Um herauszufinden, wie viel Schnee insgesamt benötigt wird, müssen wir zunächst ausrechnen, wie viel Schnee wegschmilzt.

Zunächst rechnen wir aus, wie viel Wärme durch die Isolationsschicht an das Stroh verloren geht. Folgende Konstanten sind gegeben: Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,045\frac{W}{m*K}$ Flächen $A = 70000000m^3$

Folgende Parameter sind variabel: Strohdicke d

Es soll der Wärmeverlust pro Fläche angegben werden. Es gilt:

$$P = \lambda * A * \frac{\Delta T}{d}$$

Zusätzlich wird der Wärmeverlust an der Oberseite berechnet: Es gibt eine weiter Konstante: Wärmeübertragungskoeffizient Wasser, Luft: $\alpha = 3\frac{W}{m^2K}$

$$P = \alpha * A * \Delta T$$

Damit ist der gesamte Wärmestrom Pges = Punten + Pobeb Der Schnee, der pro Sekunde wegschmilzt wird folgendermaßen berechnet: Neue Konstanten: Schmelzenthalpie von Wasser: 6010 J/mol molare Masse von Wasser: 18,015 * 10-3 kg/mol

n/t = P/Hsm

m = n * M => m/t = n/t * M

Dies führt zu:

m/t = Pges/Hsm * M

Oder v/t = Pges/Hsm * M / rhoschnee

Die Kosten für jeden m3 Schnee betragen 0.27 J / m3

Das heißt, die Energiekosten für die Strecke pro Sekunde betragen:

W/t = v/t * KostenSchnee

Die Grundenergiekosten für den Schnee am Anfang sind:

Die Grundmenge sind 7000 m3

Grundenergiekosten = Grundmenge * KostenSchnee

Die Gesamtenergiekosten sind damit: Wges = (W/t * Zeitraum + Grundenergiekosten) * Zyklen + d*A * KostenStroh

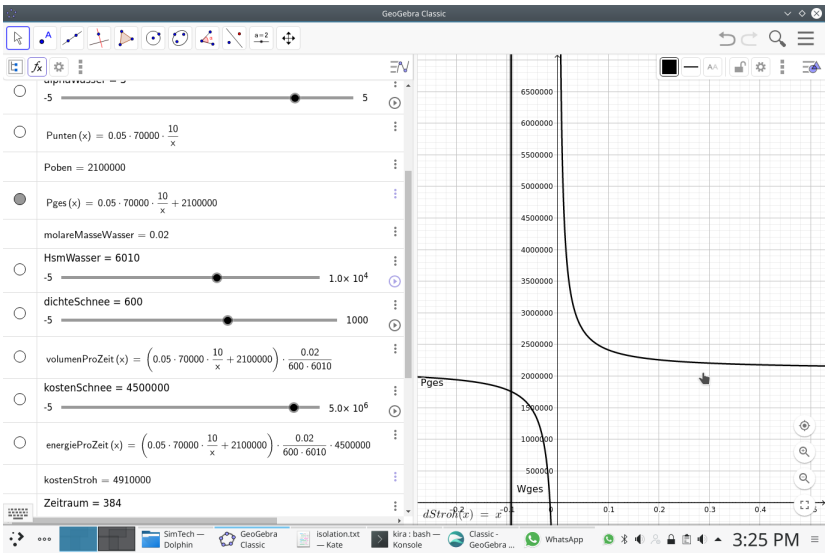

Abbildung 3: Wärmstrom in Abhängigkeit von Strohdicke

Schaut man sich den gesamten Wärmestrom in Abhängigkeit von der Strohdicke an, sieht man auch hier, dass sich der Wärmestrom kaum ändert wenn die Strohdicke mehr als die festgelegten 0.02m beträgt

Die Zyklen und der Zeitraum sind als Parameter vorhanden um herauszufinden ob es effizienter ist einmal Schnee auf die Route zu verteilen und 24/7 nachzuschütten oder jeden Tag den Schnee schmelzen zu lassen und nur für einige Stunden nachzuschütten. Es ergibt sich, dass es sich lohn, den Schnee durchgehend aufzuschütten.

Kosten Stroh Annahmen: m3 pro LKW 191.25 m3 (Höchstmaße) (https://de.wikipedia.org/wiki/Nutzfahrzeug/Maße und Gewichte

40t Benzinverbrauch: 30l pro 100km Annahme: Stroh aus Gegend ca. 100km

Verbrennungsenthalpie Benzin: 31.29 MJ/l (http://kirste.userpage.fu-berlin.de/chemistry/general/energetisch.html Wirkungsgrad Motor: 0.2

WStroh = Volumen / VolumenLKW * Benzinverbrauch * VerbrennungsenthalpieBenzin

WStroh/Volumen = Benzinverbrauch * Verbrennungsenthalpie / VolumenLKW

WStroh/Volumen = 4.908 MJ/m3 = 4.908 * 10 J/m3

Berechnet man alles in Geogebra und verwendet die Strohdicke als Parameter, so stellt sich heraus, dass sich eine dicke Strohschicht energietechnisch überhaupt nicht lohnt. Damit aber die Isolationsbedingungen erhalten bleiben und unsere Formel weiterhin gültig ist, brauchen wir eine Isolationsschicht aus Stroh, da sonst ein anderer Grenzübergang von Schnee zu Asphalt gilt. Deshalb haben wir eine Strohdicke von 2cm beibehalten. Leider kamen wir nicht dazu die Funktion graphisch darzustellen und ein Minimum zu

finden, deshalb ist dies ein durch Annähern gefundenes Minimum. Um ein Event zu veranstalten bräuchten wir insgesamt 164 Milliarden Joule Energie. Dabei sind die Energiekosten für die Herstellung des Schnees, sowie die Transportkosten für das Isolationsmaterial berücksichtigt worden. Als günstigste Methode zur Schneegewinnung stellte sich das Snowfarming heraus. Von dem gewählten Isolationsmaterial Stroh ist die optimale Dicke auf der Straße 2cm.

Import von Schnee pünktlich zu den Winterspielen im Sommer: Zuerst hatten wir an die Alpen als Herkunftsort gedacht, im Sommer findet sich allerdings kein Ort, von dem man Schneemengen in dieser Größenordnung importieren kann. Das gilt auch für Norwegen und indirekt Russland, da dort zwar geeignete Temperaturen herrschen, es sich jedoch eher um Eis als um Schnee handelt. Grönland ist hier deutlich besser geeignet, da es einerseits geographisch besser zu erreichen ist und andererseits größere Schneemengen gibt. Nach den Daten der Deutschen Bahn (1) kostet Schienenverkehr 0,4 Megajoule pro Tonnenkilometer und Seeverkehr 0,18 Megajoule pro Tonnenkilometer. Bei gerundeten Distanzen von 3000km von Grönland nach Hamburg und 600km von Hamburg nach Stuttgart und einer vorläufigen Schätzung von benötigten 15000 Tonnen Schnee ergeben sich so 11,7 Millionen Megajoule, die durch den Import von Schnee als Energiekosten entstehen würden.
Hierbei wurde die Leerfahrt des Schiffes nach Grönland vernachlässigt, ebenso wie logistische Details wie die Transportkapazität eines Zuges oder Schiffes, es wird also davon ausgegangen, dass alles auf einmal transportiert werden kann. Die Daten der Deutschen Bahn stammen aus 2011, der Einfachheit halber wird davon ausgegangen, dass diese immer noch aktuell sind. Auch politische und umweltbedingte Schwierigkeiten wurden hier ausser Acht gelassen.
Lagern von Schnee in Lagerhallen
Rund um Stuttgart bieten Lagerhallen meistens ca. 1000m2 Fläche [2], wir gehen hier von 10m Höhe aus. Damit hätte man theoretisch 10000m3 zur Verfügung. Um die gesamten ca. 20000 Tonnen Schnee bei einer Dichte von 0,6 kg/m3 zu lagern bräuchte man also 2500 Lagerhallen, da eine einzelne Lagerhalle 10000m3 * 0,6kg/m3 = 6000kg Schnee lagern kann, also 6t. Da es unrealistisch ist, 3333 Lagerhallen in einem geeigneten Umkreis von Stuttgart zu finden, ist es also unmöglich, die gesamte Schneemenge auf einmal zu lagern. Somit fällt also auch die Idee des Imports aus Grönland aus, da diese auf dem Lagerprinzip basiert. Man könnte allerdings die Schneeproduktion durch Schneekanonen in Lagerhallen stattfinden lassen, da man hierfür Temperaturen under Null (fuer Schneekanonen am besten weniger als -10 Grad) benötigt und diese Bedingungen in einem geschlossenen Raum wie einer Lagerhalle am besten herstellen kann. In einer Sekunde schmelzen 10m3 auf der gesamten Strecke, um dies auszugleichen braucht man also 0,02m3/s*3600s

= 72 m3, also nicht mal das Volumen von einer Lagerhalle. Angenommen, man kann diese Menge stündlich produzieren und zum Austragungsort der Winterspiele befördern, z.B. durch Lastwagen, könnte man die Schneeversorgung gewährleisten. Dafür bräuchte man dann mehrere Schneekanonen, die an jedem Wettkampfstag einige Stunden laufen müssten, die Energiekosten der Lagerhallen, die man auf mindestens -10 Grad kühlen müsste, und einen LKW mit Kühlanlage, der regelmäßig beladen durch die Stadt fahren müssten. Wenn man die Situation mit unserer Rechnung zur Herstellung des Schnees via Schneekanonen im Winter und Lagerung durch Snowfarming bis zum Sommer vergleicht, kommt man auf zwei Schneekanonen, also einen realistischen Wert, die Lastwagen sind energietechnisch allerdings nicht sehr effizient. Es wäre eine Möglichkeit für die Schneeversorgung während des Wettbewerbs, könnte aber die anfangs benötigte Menge vor dem Rennen nicht rechtzeitig produzieren, da nicht genug Lagerplatz vorhanden ist, und er draussen schmelzen würde.
Eine bereits als umweltfreundliche Alternative zur üblichen Verwendung der Schneekanone eingesetzte Methode der Schneegewinnung ist das Snowfarming. Dabei macht man sich die Eigenschaft von Schneekanonen zu nutze, bei kalten Temperaturen effizienter zu arbeiten. Im Vergleich zum Betrieb bei -3°C verbraucht eine Schneekanone bei -10°C nur ein Fünftel der Energie pro m^3 Schnee und kann in derselben Zeit mehr als das sechsfache Schneevolumen erzeugen. So kommt eine Schneekanone bei -10°C auf einen Stromverbrauch von $1\frac{kWh}{m^3}$ und stellt $60\frac{m^3}{h}$ her. Dieser Schnee wird beim Snowfarming auf einem großen Haufen komprimiert gelagert und mit einer Folie sowie einer Schicht Sägespäne von 1m Dicke abgedeckt, um ihn zu isolieren. Da das Stuttgarter Klima nicht ideal für Tiefsttemperaturen ist, können die Schneekanonen vermutlich nur an wenigen Tagen effizient betrieben werden. Die Schneekanonen würden nur eingeschaltet werden, wenn -10°C (annähernd) erreicht werden. Lediglich Januar und Februar haben eine negative mittlere Tiefsttemperatur, nämlich von -0,5°C bzw. -0,4°C. Man kann davon ausgehen, dass der Gefrierpunkt während dieser zwei Monate in 30 Nächten unterschritten wird und dies in den weiteren Wintermonaten in ca. 15 weiteren Nächten ebenfalls der Fall ist. In Stuttgart gab es von 2003 bis 2013 in den Monaten von Oktober bis April Minusgrade, allerdings nur von Dezember bis März unter -10°C. Gehen wir von einem kalten Winter aus, können während der angenommenen 45 Nächte unter dem Gefrierpunkt schätzungsweise 15 Nächte kälter als -10°C sein. Diese Temperatur wird erst spät erreicht und bei Tagesanbruch schnell wieder überschritten. Es ist damit zu rechnen, dass in den 15 Nächten, die kalt genug sind, eine Temperatur von -10°C nur je ca. 4h lang bestehen bleibt. Das heißt, dass die Temperatur insgesamt nur für 60h pro Winter tief genug ist. Zusätzlich zu den $34648m^3$ Schnee, die während der Olympiade benötigt werden, muss berücksichtigt werden, dass beim Snowfarming im Laufe eines Sommers 20 Prozent des Schnees abschmelzen. Daher die 1/0,8=1,25-fache Menge Schnee hergestellt werden, also $43310m^3$.

In 60h stellt eine Schneekanone $3600m^3$ Schnee her. Da $\frac{43310m^3}{3600m^3} = 12,03$ Werden mindestens 13 Schneekanonen benötigt, die 43310kWh Energie benötigen.
Im Vergleich der Methoden zur Schneegewinnung ergab sich, dass für den Transport eines Kubikmeters Schnee von Grönland zur Uni Stuttgart 468MJ Energie benötigt werden. Mit dem Verfahren des Snowfarmings ließe sich ein Kubikmeter unter nur 4,5MJ Energieverbrauch gewinnen, daher ist dieses Verfahren dem Schneetransport vorzuziehen.

3.4 Diskussion

Die Atmosphäre beeinflussen ist vermutlich einer der einfachsten Wege, um zu kühlen, da man nicht aktiv kühlen muss, sondern nur die Erwärmung durch die Strahlung der Sonne hemmt. Man könnte auch einfach nur Kühlung ab Boden betreiben, allerdings bräuchte diese viel mehr Energie, da man nur Wärme abführt. Es bleibt sehr fragwürdig, eine Winterolympiade im Sommer zu veranstalten, da die Bedingungen in einem kalten Land und im Winter einfach deutlich besser sind und man sich quasi alles an Energie spare kann. Einige andere unserer Ideen waren Kühlung durch eine nuklearen Winter (dieser wäre zwar nützlich, hätte jedoch auch heftige Nebenwirkungen), aktive Kühlung des Schnees durch z.B. Peltier-Elemente oder Laserkühlung. Auch über das Ausnutzten einer Sonnenfinsternis (am 12.08.2026 ist eine in Stuttgart)[1] haben wir spekuliert, jedoch halten wir diesen Einfluss für zu deutlich zu minimal um dafür die wärmeren Temperaturen des Augusts inkauf zu nehmen.

4 Schlussfolgerung

Abschließend lässt sich sagen, dass aufgrund der Kürze der Zeit viele Annäherungen gemacht werden mussten, die sicherlich nicht alle zutreffen. Auch das Paralleliesieren der Arbeit unter den Gruppenmitgliedern ist schwierig, da vieles voneinander abhängt. Dass die nötige Energie utopisch viel und unnötig ist, sollte jedem klar werden, der die Aufgaben nur ließt.

Literatur

[1] Astronmie. Sonenfinsternisse in Stuttgart. https://eclipse.astronomie.info/sofi/sofi.txt/STUTTGAR.HTM. Letzter Zugriff: 10.03.2018.

[2] Lagerman. Lagerhaus. urlhttp://www.lageroptimal.com/lagerflaeche-liste.php. Letzter Zugriff: 10.03.2018.

[3] Jens Lubbadeh. Wetter bei den Olympische Spielen 2008 in Peking. http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/olympia-wetter-china-schiesst-auf-regenwolken-a-569361.html. Letzter Zugriff: 10.03.2018.

[4] Umweltbundesamt. Schwefeldioxid und Umwelt. https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/schwefeldioxid. Letzter Zugriff: 10.03.2018.

[5] Wikipedia. Geoengeneering und Schwefeldioxid zum Kühlen. https://de.wikipedia.org/wiki/Geoengineering. Letzter Zugriff: 10.03.2018.

[6] Wikipedia. Schnee. https://de.wikipedia.org/wiki/Schnee. Letzter Zugriff: 10.03.2018.