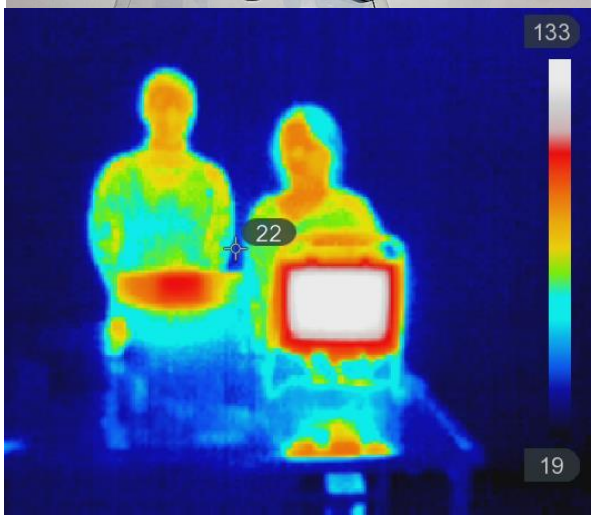
Thermochrome und infrarotreflektive Beschichtungen (TIB) - Dachziegel als Schneeersatz



Lisa Reichel, Athina Georgi
Jugend forscht
Geo- und Raumwissenschaften

Kurzfassung

Das Projekt basiert auf dem Prinzip des thermochromen Effekts von Farbpigmenten und soll den natürlichen Albedo-Effekt künstlich simulieren.

Die zugrundeliegende Intention ist, die voranschreitende Erwärmung unseres Planeten zu verlangsamen.

Umso weiter sich die Erde erwärmt, desto mehr wichtige weiße Flächen verschwinden. Beispielhaft sind die schmelzenden Gletscher Europas. Auch bleiben größere Schneeflächen in unseren Breitengraden aus, die wesentlich zur Reflektion der Sonneneinstrahlung beitragen. Weniger weiße, reflektive Flächen beschleunigen die Erderwärmung zusätzlich, da die dunklen Oberflächen die elektromagnetische Strahlung besser absorbieren.

Bislang existiert noch keine Idee, wie man diese weißen Flächen ersetzten könnte um der weiteren Erderwärmung vorzubeugen.

Es wäre aber möglich Flächen in urbanen Gebieten in weiße, sonnenstrahlenreflektierende Flächen umzuwandeln, um somit dem Klimawandel entgegenzuwirken.

Darum beschäftigt sich unser Projekt mit einer Idee, die diesem Geschehen entgegenwirken soll: Dächer, die den Albedo-Wert anheben. Unsere Grundidee ist es, dass Dächer den Effekt der Thermochromie nutzen, das heißt, dass sie im Sommer, wenn es warm und die Strahlungsintensität hoch ist, weiße Oberflächen bilden, die die einlaufende Strahlung der Sonne reflektieren. Im Winter dagegen, wenn es kalt und dunkel ist, sollen die Dächer schwarz werden, damit sie die Wärmestrahlung maximal absorbieren und somit Häuser zusätzlich erwärmen, was letztlich auch zu einem geringeren Heizbedarf führt.

An einem Modellhaus mit einem thermochromen Dach könnte nachgewiesen werden, dass bei Wärmeeinstrahlung der Erwärmungsfaktor durch eine weiße oder gar infrarotreflektive Farbe effektiv verringert wird. Dadurch könnte eine revolutionäre Nachhaltigkeit von Dächern etabliert werden, sodass eine ganz neue Möglichkeit der Dachnutzung entsteht.

Denn die privaten Haushalte in Deutschland benötigen mehr als zwei Drittel ihres Energieverbrauches zum Heizen von Räumen. Thermochrome Dächer, welche bei hohen Temperaturen (Sommer) Sonnenlicht reflektieren und bei niedrigen Temperaturen (Winter) Sonnenlicht absorbieren, können im Sommer in Häusern die Temperaturen senken und im Winter die Temperaturen erhöhen, ohne Energieverbrauch und ohne Energiekosten.

Auch sind im Sommer Städte bis zu 10-15°C wärmer als das Umland. Thermochrome Dächer, Straßen und Gehwege (etc.) könnten das städtische Mikroklima verbessern, indem sie Städte im Winter wärmen und im Sommer kühlen.

Die Menschheit versucht zusätzlich die Erderwärmung auf 1,5°C zu begrenzen. Weiße bzw. weiße infrarotreflektierende Flächen sind der beste Schneeersatz und könnten, bei Nutzung aller bebauten Flächen, die Erdtemperatur um etwa 1°C senken.

Den Beweis für diese Theorie anzutreten ist unsere Motivation für dieses Projekt.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 5
2. Vorgehensweise 6
3. Theoretische Überlegungen 8
4. Versuche und Messungen 12
Versuch 1: Oberflächentemperatur 12
Versuch 2: Innenraumtemperatur 15
5. Ergebnisdiskussion 18
6. Zusammenfassung 20
7. Abbildungsverzeichnis 21
8. Quellenangaben 22

1. Einleitung

Problemstellung:

Bei unserer Suche nach einem Jugendforscht Projekt sind wir schnell auf ein simples aber gravierendes Problem gestoßen.

Den Klimawandel.

Was können wir grundlegend verändern, um den Klimawandel entgegen zu wirken, damit unsere Welt auch noch in Zukunft bewohnbar bleibt?

Es gibt in der Welt bereits viele engagierte Klimaschutzprojekte, die auf verschiedensten Strategien beruhen. Viele basieren unter anderem auf einfachem Recycling natürlicher Ressourcen, emissionsarmen Automobilen und effizienterer Energienutzung. In unserem alltäglichen Leben ist noch vieles vorhanden, welches noch keine Wandlung erfahren hat und bis dato vernachlässigt wurde. Auch wenn Solar- oder Photovoltaikanlagen auf den oftmals weitgehend ungenutzten Dächern platziert werden, so kann man doch bestimmt noch mehr mit den Dächern erreichen, da besonders durch den steigenden demographischen Druck jedes Jahr hunderttausende neue Wohnungen und Gebäude entstehen.

Das Hauptproblem des Klimawandels ist die Erderwärmung. Dabei schmelzen vor allem große weiße Flächen, wie zum Beispiel die Polkappen und andere Gletscher. Doch genau dort liegt das Problem, denn umso weniger weiße Flächen vorhanden sind, desto weniger Sonnenstrahlung kann reflektiert werden und der Erwärmungsfaktor erhöht sich nur noch mehr.

Unsere Idee ist es nun, ein Dach zu entwerfen, dass

- die Strahlung im Sommer effizient reflektiert
- und im Winter effizient absorbiert.

Durch dieses Projekt erhoffen wir uns nun eine Möglichkeit uns gegen den Klimawandel zu engagieren und die Nachhaltigkeit von Gebäuden grundlegend zu revolutionieren.

Abb. 1 Zeigt Rohmodell des Hauses (eigene Fotografie)

2. Vorgehensweise

Um zu überprüfen, ob unsere Idee realisierbar ist, haben wir einige Versuchsmodelle entworfen, um die Begebenheiten eines Hauses realistisch nachzustellen und möglichst präzise Messungen durchführen zu können. Zum einen brauchten wir dazu ein modellhaftes Haus und einige verschiedene Arten von Dachziegeln.

Das Haus:

Es besteht aus kleinen roten Poroton-Ziegelsteinen, die wegen den Luftkammern isolierend wirken und im heutigen Baustandard oft bei Niedrigenergiehäusern gebraucht werden. Das Haus steht auf einem, aus Beton gegossenen Fundament. Es umfasst zwei Etagen mit einer Tür, einem Fenster und einem Garagentor, die mit Acryl abgedichtet wurden, um die aktuellen Gegebenheiten in Häusern akkurat darzustellen, da viele Fensterfronten in Gebäuden ebenfalls hochgradig abgedichtet werden. Hinzu kommt ein abnehmbares Dach. Das Dachgerüst besteht in erster Instanz aus Holzbalken mit einer Styropordämmung. Zusätzlich haben wir noch einen Sensor eingebaut, der auf der ersten Etage zu finden ist und welcher nicht nur die Temperatur im Haus angibt, sondern auch die Luftfeuchtigkeit messen soll.

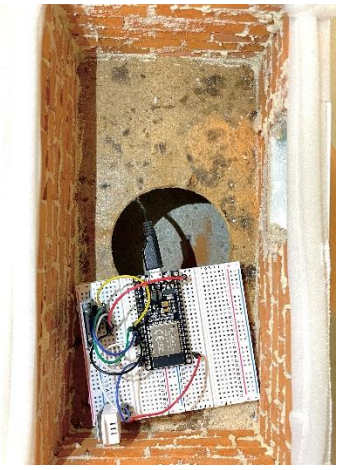


Abb. 2 Sensor im Haus (eigene Fotografie)

Abb. 3 Größe des Hauses (eigene Fotografie)

Abb. 4 Dach Innenseite (eigene Fotografie)

Abb. 5 Dachloses Haus (eigene Fotografie)

Die Dachziegel:

Um die Dachsteinziegel nachahmen zu können, benutzen wir für das Modell kleine, weiße Küchenfliesen mit einer Größe von 10 cm × 10 cm. Sie haben eine glatte Oberfläche, die den glasierten Dachziegeln am nächsten kommen. Die vorerst weißen Fliesen, wurden dann mit verschiedenen Stoffen und Farben beschichtet.

Damit wir einen optimalen Vergleich haben, gibt es die folgenden Versuchsreihen mit Fliesen

- ohne weitere Behandlung
- mit normaler schwarzer Farbe überstrichen und UV-Lackversiegelung,
- mit schwarze thermochromischer Farbe überstrichen und UV-Lackversiegelung
- mit weißer, infrarotreflektiver Farbe überstrichen, die zusätzlich den Snow-scattering-Effekt nutzt

Jedoch konnten wir die weiße, infrarotreflektive Farbe nicht auf der glatten Oberfläche der Fliesen auftragen, da sie bei dem Versuch nicht haften blieb. Stattdessen nutzten wir die raue Unterseite.

Aufgrund der noch folgenden Messungen hoffen wir bestimmen zu können, welche dieser Optionen am effektivsten für die Reflektion/Absorption der Sonnenstrahlen ist.

Abb. 6 Thermochrome Fliese unter warmem Wasser (eigene Fotografie)

Abb. 7 Alle Fliesentypen (eigene Fotografie)

3. Theoretische Überlegungen

Licht Absorption und regelmäßige Reflexion[1]

Die Absorption beschreibt die Abnahme der Intensität von Strahlung beim Durchgang durch Materie. Die dabei entstehende Strahlungsenergie kann in Wärme-, Anregungs-, Ionisierungsenergie umgewandelt werden.

Bei der optischen Absorption treffen Lichtwellen auf einen Gegenstand. Das Licht wird sowohl reflektiert, im Medium absorbiert und auch durchgelassen. Sobald aus keiner Stelle des Körpers Lichtwellen austreten, absorbiert dieser das Licht vollständig. Das absorbierte Licht wird dabei in Wärme oder andere Energieformen (chemische Energie) umgewandelt. Je mehr Lichtwellen auf einen Körper treffen, desto mehr Energie speichert dieser. Der gleichbleibende Gegenstand wird durch Angabe der Absorptionskonstante K charakterisiert. Es gilt das Bouguer-Lambertsche Absorbtionsgesetz. Dieses physikalische Gesetz beschreibt die Schwächung von außerirdischer Sonnenstrahlung, einen Durchgang durch die Erdatmosphäre. Die Änderung der Strahldichte beim Durchdringen einer Atmosphärenschicht proportional zur Strahldichte ist eine Grundlage.

$$L = L_0 e^{-\int_0^m \sigma_e dm}$$

L = Stahldichte, L_0 = Stahldichte am Außenrand der Atmosphäre, σ_e Extinktionskoeffizient Dieser beschreibt die Schwächung von elektromagnetischen Wellen durch ein Medium, bezogen auf die Weglänge durch das Medium und auf die Stoffmengenkonzentration des Stoffs. m = absorbierende und streuende Masse entlang des Lichtstrahls

Ein Medium, welches Lichtwellen vollständig absorbiert, ist für das menschliche Auge nicht mehr sichtbar, da er kein Licht aussendet, welches empfangen werden kann. Lediglich die Umgebung wird wahrgenommen. Je mehr Licht ein Körper absorbiert, desto dunkler erscheint dieser dem Menschen. Einige Gegenstände absorbieren nur bestimmte Lichtarten, hierbei ist nur die Restfarbe sichtbar.

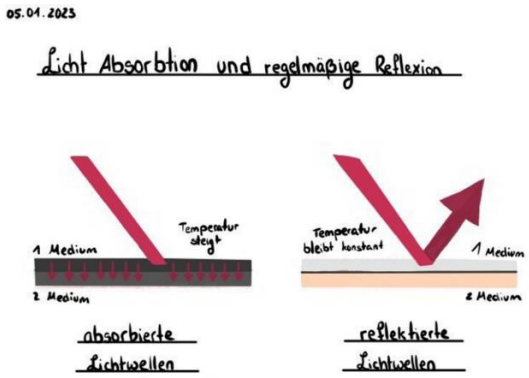


Abb. 8 Licht Absorption und regelmäßige Reflexion[2]

Bei der optischen Reflexion fällt eine Welle aus gekoppelten magnetischen und elektrischen Feldern auf die Grenzfläche zweier Medien. Hierbei wird ein Teil in das 2. Medium gebrochen, also ändert das Licht seine Richtung, weil es beim Übergang vom 1. Medium in ein anderes, nicht senkrecht auf die Grenzfläche fällt, und ein Teil in das 1. Medium reflektiert wird. Die Sobald ein Lichtstrahl auf einen Gegenstand trifft und dieser bis auf die Richtung unverändert zurückkommt, reflektiert der Körper das Licht regelmäßig. Diese regelmäßige Reflexion tritt nur an „glatten“ Grenzschichten zwischen zwei Stoffen auf, beispielsweise an einem Spiegel. Des Weiteren werfen diese Körper Schatten.

[1] Quellen: https://www.leifiphysik.de/optik/lichtausbreitung/grundwissen/stoffverhalten (zuletzt abgerufen 05.01.2023 23:10 Uhr)
„Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik“ - Verlag Moderne Industrie, 1979-1981
[2] Bildquelle: https://www.istockphoto.com/de/vektor/absorption-reflexion-und-%C3%BCbertragung-von-wellen-sichtbares-licht-gm1291590692-386661789 (zuletzt aufgerufen 06.01.2023 01:33 Uhr)

Der Albedo-Effekt[3]

Albedo ist ein Maß für das Rückkopplungsvermögen beziehungsweise des Reflexionsvermögens eines nicht selbst leuchtenden Mediums, welches stark abhängig von der Wellenlänge des einstrahlenden Lichtes ist und kann für bestimmte Wellenlängenbereiche angegeben werden. Der Albedo-Effekt kann mit einem Wert zwischen 0 bis 1 angegeben werden. Für einen absolut weißen Körper, daher ein Körper welcher alles einfallende Licht vollständig reflektiert, ist die Albedo gleich 1. Alle anderen Körper haben eine Albedo von weniger als 1. Die Körper unseres Sonnensystems reflektieren das einfallende Sonnenlicht je nach ihrer Oberflächenbeschaffenheit in verschiedener Stärke. Aus den bestimmten Werten der Himmelskörper lassen sich Vergleiche mit den Werten für irdische Substanzen auf die Oberflächenbeschaffenheit des Körpers schließen. Beispielsweise ist der Jupitermond „Europa“ so weiß wie Schnee mit einer Albedo von 0,7. Dieser absorbiert also lediglich 30 Prozent der Sonneneinstrahlung. Die Albedo von Gesteinsarten wie beispielsweise Ton liegen bei 0,2, daher werden 20 Prozent des einfallenden Lichtes reflektiert.

Die Erde besitzt einen mittleren sphärischen Wert von 0,3 Albedo, welche sich aus unterschiedlichen Oberflächen zusammensetzt. Beispielsweise haben Wasserflächen, Wüsten, Schnee, Bodenflächen, Felder, sowie Wolken und Nebel eine Auswirkung auf den Albedo-Effekt.

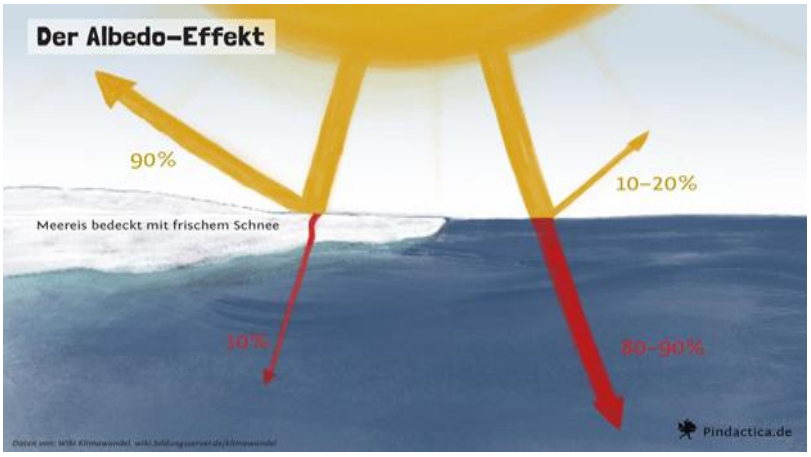


Abb. 9 Erläuterung des natürlichen Albedo-Effekt[4]

Beispiele verschiedener Oberflächen:

Material	Albedo
Neuschnee/Eis	0,75 – 0,95
Wolken	0,60 – 0,90
Wüste/Düne	0,30 – 0,60
Savanne	0,20 – 0,25
Wiese	0,12 – 0,30
Laubwald	0,15 – 0,20
Nadelwald	0,05 – 0,12
Ortschaft	0,15 – 20
Asphalt	0,15
Ackerboden	0,08
Wasserfläche	0,03 – 0,80

Abb. 10 Beispiele verschiedener Oberflächen

Die Albedo der Erde ist nicht konstant durch die Veränderung der Landoberflächen des Planeten. Beispielsweise die Ausbreitung von Wüsten, die Rodung von Wäldern oder das Schmelzen von Schnee. Dies hat einen Einfluss auf das Reflexionsvermögen der Erde von Licht und somit auch Wärmeenergie, welche zurück in den Weltraum geschickt wird. Dies entscheidet also über die Abkühlung oder die Erwärmung der Erde. Daher spielt der Albedo-Effekt eine entscheidende Rolle im globalen Klimawandel.

Der Wert unterscheidet sich je nach Ort, so besitzen die Pole das höchste Rückstrahlvermögen auf der Erde. Doch durch den selbst verstärkenden Prozess der Albedo-Eis-Rückkopplung, eine Wechselwirkung zwischen dem globalen Klima und der schnee- und eisbedeckten Erdoberfläche, schmilzt das Eis an den Polen und wird zu Meerwasser. Dies verringert die Albedo der Erde ungemein, da Wasser einen geringeren Albedo -Wert hält als Schnee und Eis. Durch das hinzukommende Wasser erwärmt sich die Erde schneller und beschleunigen die Schmelze der Pole.

[3] Quellen: https://de.m.wikipedia.org/wiki/Eis-Albedo-R%C3%BCckkopplung (zuletzt aufgerufen 06.01.2023, 00:10 Uhr)
https://de.m.wikipedia.org/wiki/Albedo (zuletzt aufgerufen 06.01.2023 00:07 Uhr)
„Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik“ - Verlag Moderne Industrie, 1979-1981
https://studyflix.de/erdkunde/albedo-5698 (zuletzt aufgerufen 06.01.23 01:27 Uhr)
[4] Bildquelle: https://www.pindactica.de/selbermachen/albedo-effekt-experiment/ (zuletzt aufgerufen 06.01.2023 01:36 Uhr)

Der Treibhauseffekt[5]

Eine mögliche Ursache des Klimawandels ist der Treibhauseffekt, spezifischer der anthropogene, also Menschengemachte Treibhauseffekt. Dieser beschreibt die Wirkung der Treibhausgase in der Atmosphäre. Treibhausgase absorbieren von der Planetenoberfläche abgegeben, langwellige Wärmestrahlung welche ins Weltall abgegeben werden würde. Zu den wichtigsten, langlebigen Treibhausgasen zählen Kohlenstoffdioxid (CO2), Methan (CH4) und Distickstoffmonoxid (N2O). Zuerst gelangen Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre zur Erdoberfläche, auf der Erde werden diese dann zusätzlich in Wärmestrahlung, welche durch Infrarotlicht übertragen wird, umgewandelt. Ein Teil wird in der Erde als Wärme aufgenommen, der Rest wird als Wärmestrahlung ins All zurückgeschickt. Durch die Treibhausgase verlässt die Wärme unsere Atmosphäre nicht vollständig. Sie halten einen Teil der Wärme auf und schicken diese auf die Erde zurück. Hierdurch erwärmt sich die Erde ein zweites Mal. Es wird zwischen dem natürlichen und dem anthropogenen Treibhauseffekt unterschieden. Wenn sich die Erde ohne Einfluss des Menschen erwärmt, spricht man vom natürlichen Treibhauseffekt. Treibhausgase wie Kohlenstoffdioxid kommen in der natürlichen Umwelt vor, diese sind beispielsweise ein Nebenprodukt der Zellatmung. Ohne den natürlichen Treibhauseffekt läge unsere durchschnittliche Temperatur auf der Erde bei minus 18 Grad Celsius und nicht bei plus 15 Grad Celsius.

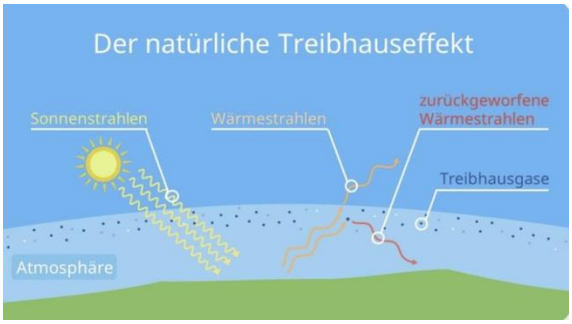


Abb. 11 der natürliche Treibhauseffekt[6]

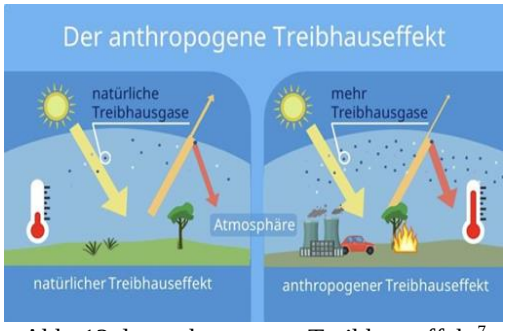


Abb. 12 der anthropogene Treibhauseffekt[7]

Der menschengemachte Treibhauseffekt beschreibt die menschliche Produktion der Treibhausgase. Beispiele hierfür sind die Treibhausgase, die durch das Autofahren, das Halten von Nutztieren oder Industrien freigesetzt werden. Durch die Vermehrung der Treibhausgase wird der Treibhauseffekt verstärkt und die Erde zusätzlich erwärmt. Der anthropogene Treibhauseffekt ist unter anderem also eine Ursache des Klimawandels und bringt Folgen wie schmelzende Eiskappen, steigende Meeresspiegel und Extremwetterlagen mit sich. Mit Beginn der Industrialisierung stieg die Konzentration der Treibhausgase in der Erdatmosphäre. Die Ursache hierfür ist der anthropogene Treibhauseffekt durch die starke Freisetzung der Treibhausgase.

Diese Grafik zeigt den Anstieg der Temperatur vom Beginn der Industrialisierung bis heute.

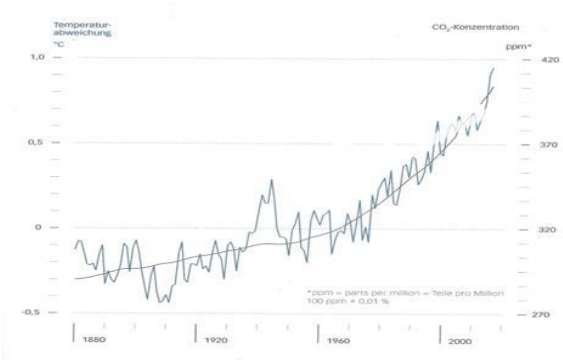


Abb. 13 Anstieg der Temperatur vom Beginn der Industrialisierung bis heute

[5] Quellen: https://de.wikipedia.org/wiki/Treibhausgas (zuletzt aufgerufen: 08.01.2023 10:02)
https://studyflix.de/erdkunde/treibhauseffekt-einfach-erklart-3810 (zuletzt aufgerufen: 08.01.2023 09:42)
„Kleine Gase- Große Wirkung“ - David Nelles und Christian Serrer
[6] Bildquelle: https://studyflix.de/erdkunde/treibhauseffekt-einfach-erklart-3810 (zuletzt aufgerufen: 08.01.2023 09:42)
[7] Bildquelle: https://studyflix.de/erdkunde/treibhauseffekt-einfach-erklart-3810 (zuletzt aufgerufen: 08.01.2023 09:42)

Thermochrome Farbe[8]

Die Thermochromie bezeichnet die Eigenschaft einer bestimmten Substanz bei Temperaturerhöhung die Farbe zu wechseln und bei Abkühlen dann wieder die Ausgangsfarbe anzunehmen. Diese Farbveränderung ist das Resultat einer Änderung in der Kristallstruktur. Ein Beispiel für diese Eigenschaft ist das Zinkoxid, welches sich bei starkem Erhitzen von weiß zu gelb verfärbt und beim Abkühlen wieder weiß wird.

Die von uns genutzte thermochrome Farbe verfärbt sich bei einer Temperatur von ca. 26 Grad Celsius von schwarz zu nahezu transparent und wird wieder schwarz, wenn die Temperatur der Farbe unter 26 Grad Celsius fällt. Hierzu nutzen wir eine Basis in Form von weiß lackierten Fliesen, um den Wechsel zwischen Schwarz und Weiß zu verdeutlichen.

Infrarotreflektierende Farbe[9]

Die selbst hergestellte infrarotreflektierende Farbe beruht auf dem Prinzip der Strahlungskühlung. Dies ist eine passive Kühltechnologie, die durch Reflexion von Sonnenlicht und Emission von Strahlung im Himmelsfenster wirkt. Dieses Fenster ist der Wellenlängenbereich zwischen 8 und 13 Mikrometern elektromagnetischer Strahlung (Wärme), welche vollständig an das Weltall abgegeben wird. Eine ganztägige Strahlungskühlung unterhalb der Umgebungstemperatur wurde in handelsüblichen Einschicht-Partikelmatrix-Farben nicht erreicht. Es wurde jedoch festgestellt, dass Schnee ein Rückstrahlvermögen von bis zu 95% besitzt, sowie einen geometrischen Aufbau und eine hohe Teilchengröße, welche zu dieser hohen Albedo führen. Die infrarot reflektierende Farbe soll somit die Eigenschaften des Schnees imitieren.

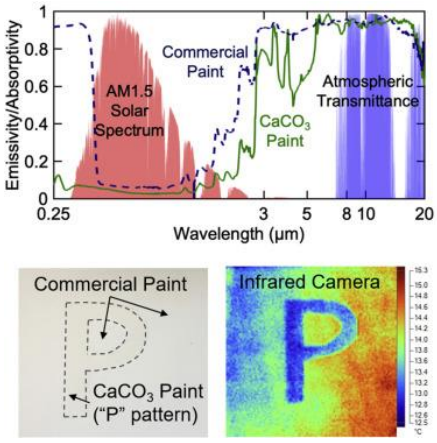


Abb. 14 Vergleich der infrarotreflektierenden Farbe mit handelsüblicher Farbe[10]

Abb. 15 PMMA in Aceton aufgelöst (eigene Fotografie)

Zu Beginn lösen wir 9,37 Gramm Polymethacrylat (PMMA), einen transparenten thermoplastischen Kunststoff in 93,7 Gramm Aceton auf. Die entstehende Lösung wiegt 103,07 Gramm. Hierbei erstreben wir eine 10 % Lösung des PMMA in Aceton an. Als nächstes geben wir zwei Milliliter pro Gramm an Kunststoff in die Lösung. Da eine vierprozentige Lösung gebraucht wird, geben wir 11,28 Milliliter Wasser dazu. Zuletzt fügen wir zwei Gramm Bariumsulfat pro ein Gramm an PMMA hinzu, dadurch benötigten wir 18,8Gramm Bariumsulfat. Dadurch entstand eine trübe Mischung mit Bodensatz, welche, unsere fertige Farbe darstellt. Diese tragen wir mit einem Pinsel auf unsere, mit Aceton gereinigten Dachziegel auf.

---

[8] Quellen: https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Thermochromie (zuletzt aufgerufen: 14.01.23 14:20 Uhr)
[9] Quellen: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666386420302368?via%3Dihub (zuletzt aufgerufen: 14.01.23 16:02 Uhr)
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435118304689 (zuletzt aufgerufen: 14.01.23 16:04 Uhr)
https://www.mdpi.com/2073-4352/8/9/333/htm (zuletzt aufgerufen: 14.01.23 16:07 Uhr)
https://www.proceedings.iaamonline.org/article/vpoam-2021-0149 (zuletzt aufgerufen: 14.01.23 16:14 Uhr)
https://www.skycoolsystems.com/ (zuletzt aufgerufen: 14.01.23 16:19 Uhr)
https://www.radi-cool.com.my/media (zuletzt aufgerufen: 14.01.23 16:25 Uhr)
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666386420302368?via%3Dihub (zuletzt aufgerufen: 14.01.23 15:10 Uhr)
[10] Bildquelle: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666386420302368?via%3Dihub

4. Versuche und Messungen

Versuch 1: Oberflächentemperatur

Um die folgenden Messungen durchführen zu können, brauchten wir zuerst die verschiedenen Fliesen, also welche mit

- normaler weißer Farbe,
- normaler schwarzer Farbe und UV-Lackversiegelung,
- thermochromer schwarzer Farbe auf weißem Grund und UV-Lackversiegelung,
- weißer, infrarotreflektiver Farbe auf der Rückseite der Fliesen

Außerdem brauchten wir für diesen Versuch eine einfache Holzplatte, damit der Untergrund nicht die Fliesen zusätzlich erwärmen konnte und einen Baustrahler mit maximaler Wärmeabstrahlung, der nicht nur für die Wärmeeinstrahlung sorgte, sondern auch die Sonneneinstrahlung imitierte. Als wir all diese Materialien zusammen hatten, begannen wir mit dem Aufbau.

Wir errichteten ein Gerüst aus Stativen und Stativklammern, das den Baustrahler waagerecht etwa 50 cm über dem Boden schweben lässt. Genau unter diese Fläche legten wir eine Holzplatte, die als neutraler Untergrund gelten sollte und die Fliesen nicht zusätzlich erwärmte.

Dann kamen pro Messung je sechs Fliesen der gleichen Art auf die Holzplatte und wurde unter dem Baustrahler immer 20 Minuten bestrahlt. Währenddessen erfolgten alle 30 Sekunden Messungen mit einem Infrarot-Thermometer mit Dual-Laserpointer, den man auf die Oberfläche einer Fliese fokussieren konnte. Die angezeigten Temperaturen wurden dann dokumentiert.

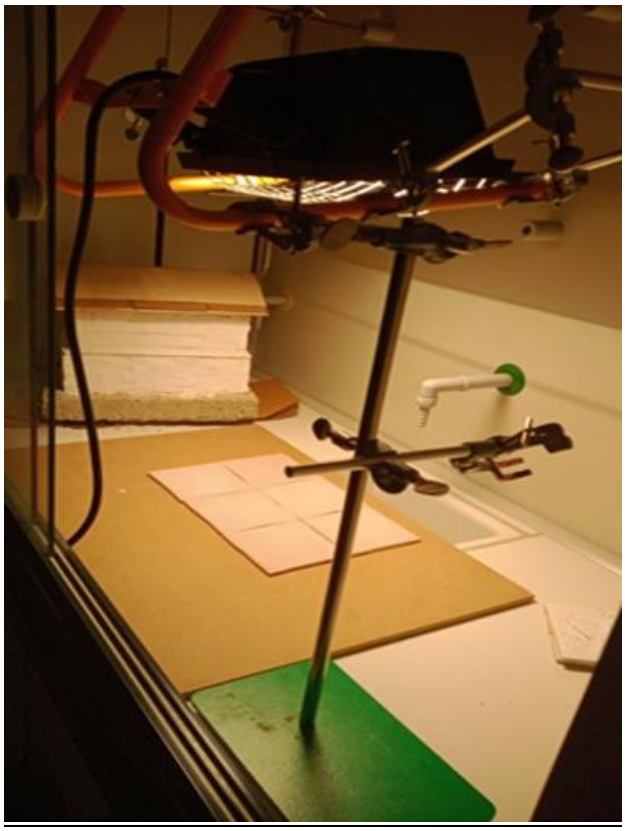


Abb. 16: 1. Versuchsaufbau (eigene Fotografie)

Messungen der Oberflächentemperatur:

Zeit in min	Infrarot-reflektive Farbe Temp. in °C	Weiße Farbe Temp. in °C	Schwarze Farbe Temp. in °C	Thermo-chrome Farbe Temp. in °C		Zeit in min	Infrarot-reflektive Farbe Temp. in °C	Weiße Farbe Temp. in °C	Schwarze Farbe Temp. in °C	Thermo-chrome Farbe Temp. in °C
0:00	22,2	24,3	23,2	20,5		**10:30**	37,0	36,9	55,5	46,6
0:30	25,2	25,7	26,5	25,6		**11:00**	37,4	37,5	56,3	45,2
1:00	26,0	26,3	28,7	27,2		**11:30**	37,8	37,8	56,9	46,9
1:30	26,5	27,2	30,9	28,2		**12:00**	38,1	38,3	57,9	46,7
2:00	27,4	27,8	32,8	29,4		**12:30**	38,5	38,6	58,7	46,8
2:30	27,8	28,4	34,6	30,5		**13:00**	39,2	39,0	59,4	47,1
3:00	28,6	29,3	36,1	31,8		**13:30**	39,4	39,3	60,2	47,5
3:30	29,1	29,7	37,8	33,2		**14:00**	39,7	39,5	61,3	47,8
4:00	29,7	30,5	39,4	33,5		**14:30**	40,2	39,7	61,8	48,3
4:30	30,3	30,9	40,7	35,0		**15:00**	40,3	40,2	62,6	49,2
5:00	30,9	31,4	42,0	36,4		**15:30**	40,5	40,3	62,9	48,8
5:30	31,5	32,2	43,4	36,8		**16:00**	40,7	40,7	63,4	49,0
6:00	32,3	32,6	45,0	37,2		**16:30**	41,1	41,1	64,0	49,2
6:30	32,7	33,4	46,2	39,2		**17:00**	41,3	41,6	64,8	49,9
7:00	33,4	34,0	47,5	39,9		**17:30**	41,5	41,8	65,3	50,4
7:30	33,9	34,5	49,0	40,4		**18:00**	42,0	42,1	65,9	50,4
8:00	34,5	35,0	50,0	41,2		**18:30**	42,4	42,3	66,4	50,7
8:30	35,0	35,4	51,1	42,3		**19:00**	42,6	42,5	67,1	51,1
9:00	35,4	35,7	52,3	42,9		**19:30**	42,7	42,8	67,8	51,5
9:30	35,9	35,9	53,4	43,3		**20:00**	43,1	43,0	68,2	51,1
10:00	36,6	36,6	54,3	45,2						

Abb. 17 Messungen der Oberflächentemperatur (eigene Tabelle)

Graphische Darstellung der Messergebnisse:

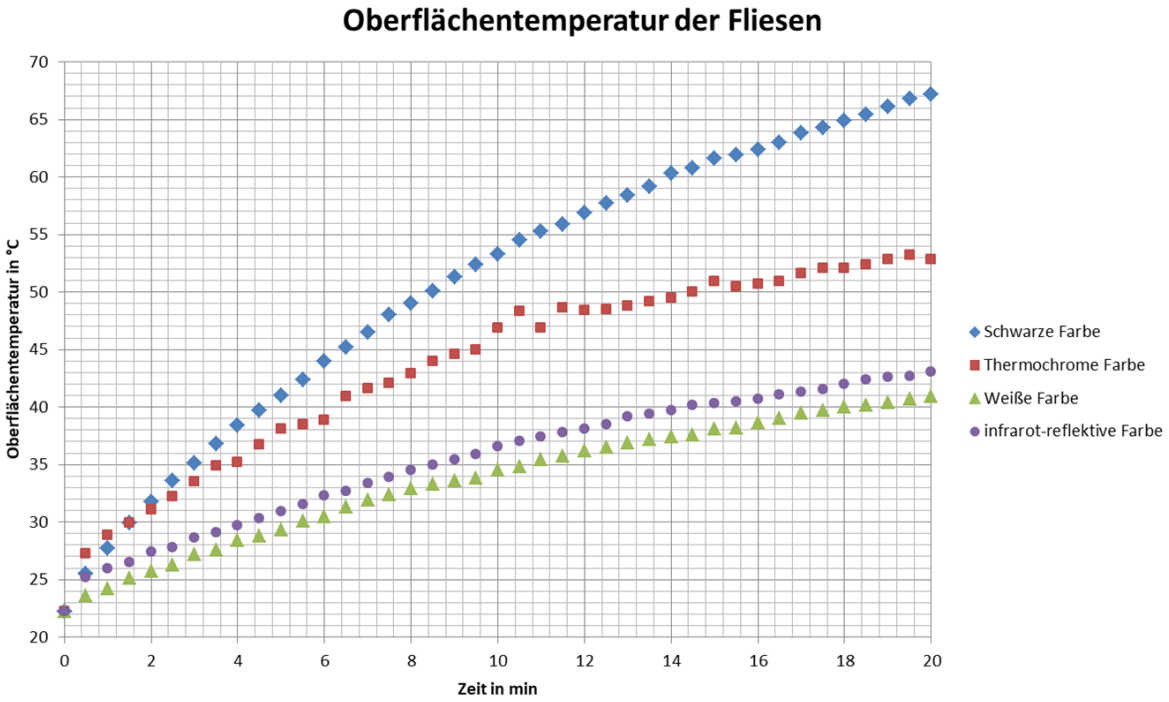


Abb. 18 Graphische Darstellung der Messergebnisse (eigene Darstellung)

Messungen der Oberflächentemperaturänderung innerhalb von 20 Minuten:

Schwarz:	Start: 22,2°C Ende: 67,2°C Differenz: 45,0°C	**Thermochrom:**	Start: 22,0°C Ende 52,8°C Differenz: 30,8°C
Weiß:	Start: 22,5°C Ende: 40,9°C Differenz: 18,4°C	**Infrarot:**	Start: 22,1°C Ende 43,1°C Differenz: 21,0°C

Abb. 19: Oberflächentemperaturänderung innerhalb von 20 Minuten (eigene Darstellung)

Messungen der Oberflächentemperaturänderung nach 60 Minuten:

Schwarz: 106,3°C	**Thermochrom:** 66,8°
Weiße: 56,5°C	**Infrarot:** 54,6°C

Abb. 20: Oberflächentemperaturänderung innerhalb von 60 Minuten

Versuch 2: Innenraumtemperatur

Da wir nun herausfinden wollen, ob die Fliesen auch das Innenleben des Hauses beeinflussen können, gibt es eine weitere Messreihe.

Dafür brauchen wir unser Modellhaus, das wir zuvor zusammengebaut haben. Auch unsere verschiedenen Fliesen kommen zum Einsatz, sowie der Baustrahler.

Der Baustrahler wird bei diesem Versuch 40 cm schräg über dem Haus platziert, auf dem die verschiedenen Fliesen abgelegt werden. Dabei bestrahlt der Baustrahler hauptsächlich eine Dachseite.

Das Haus wird pro Fliesenart für 60 Minute mit dem Baustrahler bestrahlt und die Sensoren im ersten Stockwerk werden in gleichmäßigen Abständen von einer Minute die Temperatur, sowie die Luftfeuchtigkeit im Haus aufzeichnen.

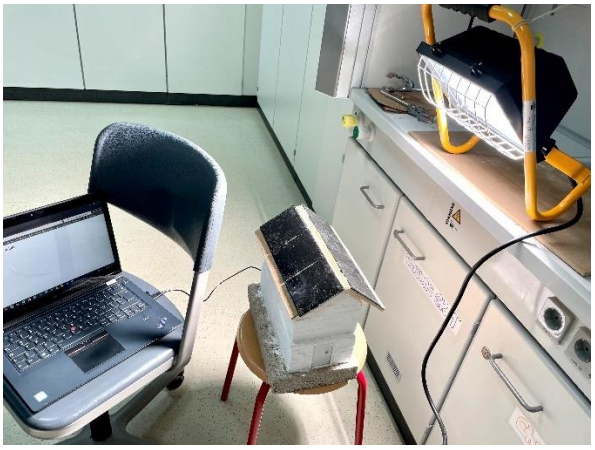


Abb. 21: 2. Versuchsaufbau (1) (eigene Fotografie)

Abb. 22: 2. Versuchsaufbau (2) (eigene Fotografie)

ESP32 DHT22-Sensorprotokoll

Temperatur: 23.60 C

Luftfeuchtigkeit: 48.10 %

Abb. 23: Screenshot Sensorprotokoll während des Versuchs innerhalb des Hauses (eigene Fotografie)

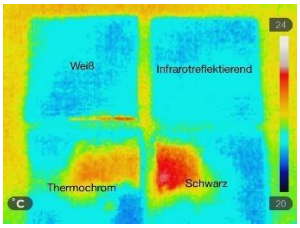


Abb. 24: Wärmebild 0 min (eigene Fotografie)

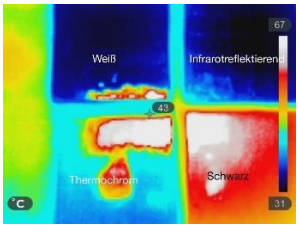


Abb. 25: Wärmebild nach 10 min (eigene Fotografie)

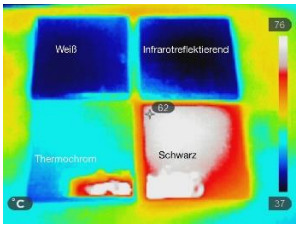


Abb. 26: Wärmebild nach 20 min (eigene Fotografie)

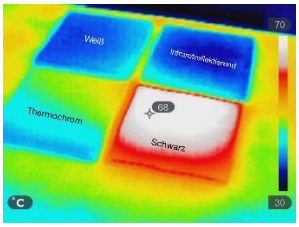


Abb. 27: Wärmebild nach 30 min (eigene Fotografie)

Graphische Darstellung der Innenraumtemperatur im Haus unterhalb des Dachs:

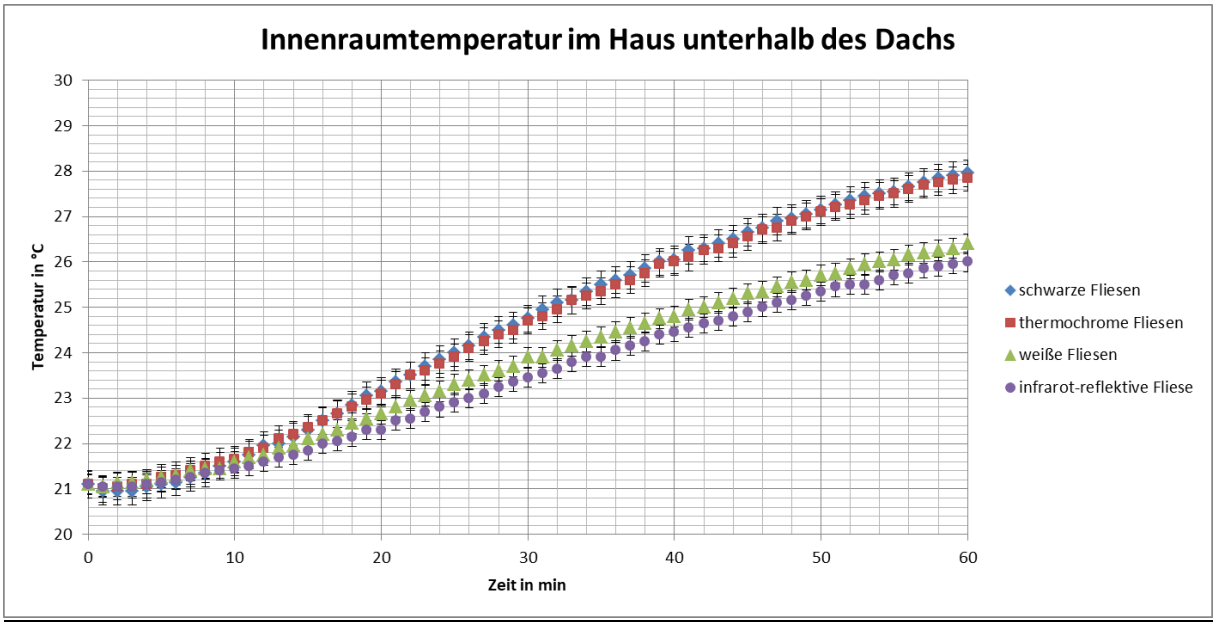


Abb. 28: Graphische Darstellung der Innenraumtemperatur im Haus (eigene Darstellung)

Messungen der Innenraumtemperaturänderung innerhalb von 60 Minuten:

Schwarz:	**Start 21,0°C** Ende: 27,5°C Differenz: 6,5°C	**Thermochrom:**	**Start 21,1°C** Ende: 28,3°C Differenz: 7,2°C
Weiß:	**Start 21,5°C** Ende: 25,4°C Differenz: 3,9°C	**Infrarot:**	**Start 21,2°C** Ende: 26,9°C Differenz: 5,7°C

Abb. 29: Innenraumtemperaturänderung innerhalb von 60 Minuten (eigene Darstellung)

Graphische Darstellung der Luftfeuchtigkeit im Haus unterhalb des Dachs:

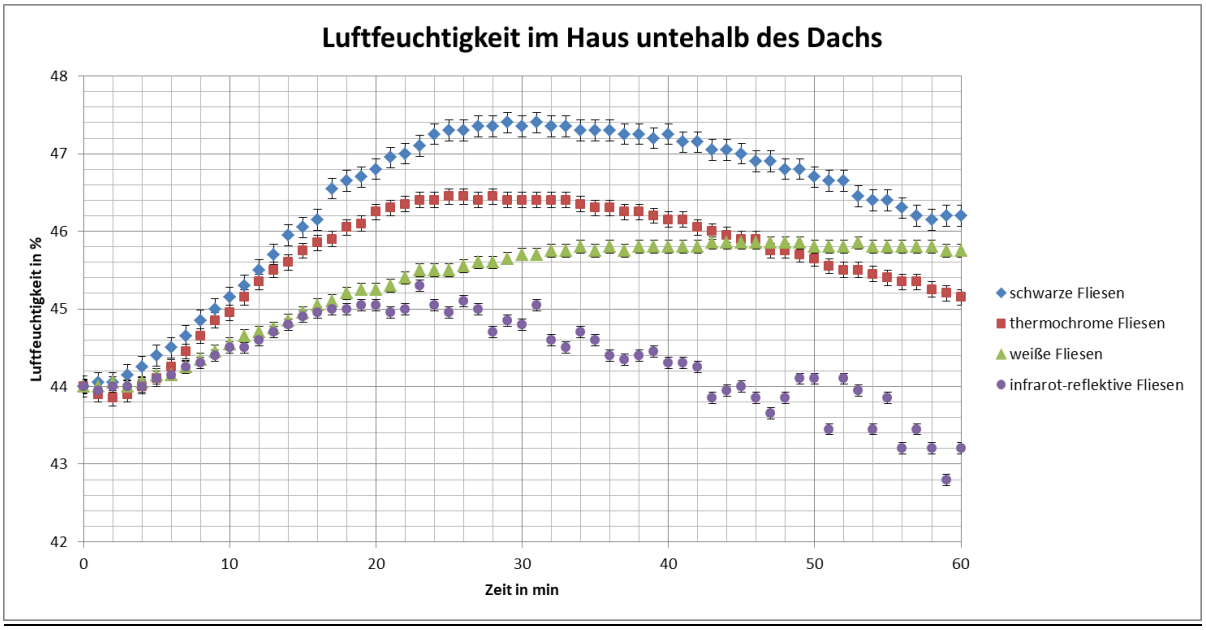


Abb. 30: Graphische Darstellung der Innenraumtemperatur im Haus (eigene Darstellung)

Messungen der Luftfeuchtigkeitsänderung innerhalb von 60 Minuten:

Schwarz:	Start: 44,1 % Ende: 46,8 % Differenz: 2,7 %	**Thermochrom:**	Start: 44,3 % Ende: 46,2 % Differenz: 1,9 %
Weiß:	Start: 44,0 % Ende: 44,3 % Differenz: 0,3 %	**Infrarot:**	Start: 44,1 % Ende: 44,7 % Differenz: 0,6 %

Abb. 31: Luftfeuchtigkeitsänderung innerhalb von 60 Minuten (eigene Darstellung)

5. Ergebnisdiskussion

Auswertungen der Messungen:

In unserem ersten Versuch fällt direkt auf, dass die thermochrome Farbe im Gegensatz zu der schwarzen Farbe einen großen Effekt bei der Oberflächentemperatur zeigt. Allein nach 20 Minuten lässt sich ein Temperaturunterschied von fast 15 °C erkennen. Nach 60 Minuten schon 40°C. Jedoch mussten wir feststellen, dass die thermochrome Farbe in dem zweiten Versuch nicht so abschnitt wie erhofft und deshalb nur einen kleinen Effekt bei der Innenraumtemperatur und der Luftfeuchtigkeit besitzt.

Obwohl die infrarotreflektive Farbe erst nach fast 60 Minuten einen Effekt von 2°C weniger als die handelsübliche weiße Farbe bei der Oberflächentemperatur gezeigt hat, kann aber bei den anderen Messungen auch von kleinen Unterschieden ausgehen. Zudem muss man aber dazusagen, dass unsere selbstgemachte Farbe aufgrund der Mischverhältnisse nicht optimal sein könnte, jedoch wollen wir an einigen weiteren Rezepturen arbeiten um das Rückstrahlvermögen auf das Maximale zu heben.

Zukunftsperspektiven:

In der kommenden Zeit fokussieren wir uns auf Versuche unter realen Bedingungen, beispielsweise mithilfe der Sonne, sowie der Leistung unser Dachziegel unter verschiedenen Wettervorrausetzungen. Diese sollten dann ebenfalls als Langzeituntersuchungen über den Sommer hinweg erfolgen. Hierbei liegt unser Fokus auf den thermochromen Fliesen und ihren zukünftigen Messdaten. Wir erhoffen uns einen ebenso guten Effekt wie bei den Messungen mit dem Baustrahler. Des Weiteren werden wir das Rückstrahlvermögen unserer Farben im Labor testen lassen, um einen Überblick über die Effektivität der Farbe zu bekommen. Zuletzt sind auch andere Arten von reflektierenden Farben geplant, welche die Effektivität der thermochromen Farbe im durchsichtigen Zustand verbessern sollen, beispielsweiße eine Farbe ähnlich der Fahrbahnmarkierungen auf unseren Straßen.

Raumklima:[11]

Unser Ziel war es im Winter mit der Sonne zu wärmen und im Sommer durch Reflektion des Sonnenlichtes das Überhitzen zu vermeiden.

Jedoch ist uns bei den thermochromen Dachziegeln aufgefallen, dass der Effekt eher klein ausfällt, wenn das Haus gut gedämmt ist. Jedoch könnten thermochrome Vorhänge und Fußbodenbeläge (z.B. Fliesen) mit Farbwechsel bei etwa 20 °C auch bei guter Wärmedämmung funktionieren. Man könnte etwa Vorhänge auf der Ostseite eines Hauses für die Morgensonne anbringen und Fliesen in einem Wintergarten oder Gewächshaus einbauen, sodass sich das Haus von Innen regulieren kann. Die Konsequenz daraus wäre ein reduzierter Energieverbrauch. Die CO2-Emissionen könnten dadurch verringert werden, wodurch auch eine geringere Erderwärmung garantiert wird. Auch kommt es zu geringeren Energiekosten sowie zu einem geringeren Energieverbrauch, was zu mehr Versorgungssicherheit besonders im Kontext des Ukraine-Kriegs und der hohen Inflation führt. Dies könnte vor allem für die privaten Haushalte in Deutschland von Bedeutung sein. Sie benötigen nämlich mehr als zwei Drittel ihres Endenergieverbrauchs, um Räume zu heizen. Die Bevölkerungsentwicklung und die Struktur der privaten Haushalte deuten aber daraufhin, dass mehr Haushalte, größeren Wohnflächen und weniger Mitglieder pro Haushalt tendenziell zu einem höheren Verbrauch führen.

[11] Quellen: https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#hochster-anteil-am-energieverbrauch-zum-heizen (zuletzt abgerufen 04.04.2023 12:14 Uhr)

Städtisches Mikroklima:[12]

Auch hier war es unser Ziel im Winter mit der Sonne zu wärmen und im Sommer durch Reflektion des Sonnenlichtes das Überhitzen zu vermeiden.

In einer aktuellen globalen Studie der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission untersuchten Wissenschaftler zwischen 2003 und 2020 den Unterschied zwischen den Oberflächentemperaturen städtischer Gebiete und ihren benachbarten ländlichen Gebieten im Sommer. In Zusammenarbeit mit Satellitendaten messen Wissenschaftler, dass die Oberflächentemperaturen in Städten manchmal bis zu 10-15 °C höher waren als in ihrer ländlichen Umgebung. Jedoch leben mehr als die Hälfte der Menschen weltweit in Städten, und der Anteil der Stadtbewohner wird voraussichtlich weiterwachsen. Besonders bedrohlich sind Städte, die oft unter „Wärmeinseln" leiden, wobei das Phänomen der Temperaturen in Städten höher ist als in benachbarten ländlichen Gebieten. Dies verstärkt die Wirkung von Hitzewellen in Städten und erhöht das Risiko für die menschliche Gesundheit.

Mithilfe unserer Messreihen konnten wir aber feststellen, dass z.B. thermochromen Dachziegel, Straßen und Gehwegen die Oberflächentemperatur deutlich verringern könnten. Somit könnte das Phänomen der Wärmeinseln abgeschwächt und das Risiko bei Hitzewellen für die menschliche Gesundheit gesenkt werden.

Denn wer im Sommer schon einmal barfuß über dunklen Asphalt gegangen ist, weiß, dass die Farbe einen großen Unterschied macht.

Erderwärmung:[13]

Fortlaufend setzten wir uns mit der Theorie der thermochromen Farbe auseinander. Die Frage der Effektivität von thermochromen Oberflächen war hierbei unser Ansatz. Zunächst wurde das Rückstrahlvermögen der gesamten Erde betrachtet, wobei Eis durch die hohe Albedo einen Großteil übernimmt. Der größte Eisanteil befindet sich an den Polarkappen. Jedoch ist die Sonneneinstrahlung dort am geringsten, daher ist das Rückstrahlvermögen dort eher schwach. Am Äquator besteht eine 3,4-Mal so starke Sonneneinstrahlung wie an den Polen. Wenn man nun die bebauten 0,3% der Erdoberfläche betrachtet, die hauptsächlich viel näher am Äquator als an den Polen liegen, und dort eine künstliche Eisoberfläche entstehen würde, dann könnte man dort von einem Rückstrahlvermögen etwa 3-mal so stark wie an den Polen ausgehen,- d.h. $1m^2$ weiße Stadt bei niedrigem Breitengrad kann etwa $3m^2$ Polarkreis ersetzen. Da etwa 10% der Erdoberfläche mit Eis bedeckt sind (bei hohen Breitengraden), könnte der gesamte bebaute Teil der Erdoberfläche (bei niedrigen Breitengraden) etwa ein Zehntel der globalen Eisfläche ersetzen. Dies würde das gesamte Rückstrahlvermögen der Erde anheben und eine verringerte Aufnahme der Wärme auslösen.

Wären die bebauten 0,3% der Erdoberfläche weiß, so könnte man davon ausgehen, dass die Erde etwa 0,3% weniger Energie von der Sonne absorbieren würde. Dies würde die Erdtemperatur von etwa 300 Kelvin um etwa 0,3% senken, was etwa 1 Kelvin, bzw. 1°C, entspricht. Somit wären wir in der Lage die Erdtemperatur um etwa 1°C zu reduzieren. Bei genauerer Betrachtung sollte einerseits die stärkere Bebauung bei niedrigen Breitengraden den Effekt verstärken und andererseits Bewölkung den Effekt verringern. Diese Rechnung dient der groben Orientierung und das Ergebnis ist, vor allem im Hinblick auf das Klimaziel mit 1,5°C, sehr ermutigend.

[12] Quellen: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news/cities-are-often-10-15-degc-hotter-their-rural-surroundings-2022-07-25_en (zuletzt abgerufen 02.04.2023 16:33 Uhr)
[13] Quellen: https://climate.nasa.gov/interactives/global-ice-viewer/#/ (zuletzt abgerufen 3.04.2023 13:56 Uhr)
https://ourworldindata.org/how-urban-is-the-world (zuletzt abgerufen 6.04.2023 12:27 Uhr)

6. Zusammenfassung

Unser Projekt “Thermochrome und Infrarotreflektive Beschichtungen (TIB)- Dachziegel als Schneeersatz" basiert und der Theorie der Absorption und Reflexion, dem Albedo Effekt, dem Treibhauseffekt, der thermochromen sowie der infrarotreflektierenden Farbe. Zu Beginn verleihen wir dem selbstgebauten Modellhaus die Eigenschaften der Schnee imitierenden Fähigkeit unserer infrarot reflektierenden Farbe, sowie den farbwechselnden Fähigkeiten der thermochromen Beschichtung. Hierdurch wollen wir die Dunkelflächen der Erde, sowie die Absorption von Sonnenstrahlung auf der Erde verringern. In unseren Messreihen prüften wir das Verhalten der einzelnen Dachziegeltypen mit den einzelnen Farben und stellen die Eigenschaften dieser fest. Hierbei nutzten wir eine Wärmebildkamera. Auch haben wir anhand der Aufzeichnungen über die Dachtemperatur, Innenraumtemperatur sowie die Luftfeuchtigkeit des Sensors im ersten Stock festgestellt, dass unsere thermochrome und infrarotreflektive Beschichtungen effektiv zur Verbesserung des städtischen Mikroklimas und Raumklimas und zur Verlangsamung der Erderwärmung beitragen können.

7. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Zeigt Rohmodell des Hauses (eigene Fotografie)
- Abb. 2: Sensor im Haus (eigene Fotografie)
- Abb. 3: Größe des Hauses (eigene Fotografie)
- Abb. 4: Dach Innenseite (eigene Fotografie)
- Abb. 5: Dachloses Haus (eigene Fotografie)
- Abb. 6: Thermochrome Fliese unter warmem Wasser (eigene Fotografie)
- Abb. 7: Alle Fliesentypen (eigene Fotografie)
- Abb. 8: Licht Absorption und regelmäßige Reflexion:
    - https://www.istockphoto.com/de/vektor/absorption-reflexion-und-%C3%BCbertragung-von-wellen-sichtbares-licht-gm1291590692-386661789 (zuletzt aufgerufen 06.01.2023 01:33 Uhr)
- Abb. 9: Erläuterung des natürlichen Albedo-Effekt:
    - https://www.pindactica.de/selbermachen/albedo-effekt-experiment/ (zuletzt aufgerufen 06.01.2023 01:36 Uhr)
- Abb. 10: Beispiele verschiedener Oberflächen
    - https://studyflix.de/erdkunde/albedo-5698 (zuletzt aufgerufen 06.01.23 01:27 Uhr)
- Abb. 11: der natürliche Treibhauseffekt
    - https://studyflix.de/erdkunde/treibhauseffekt-einfach-erklart-3810 (zuletzt aufgerufen: 08.01.2023 09:42)
    - „Kleine Gase- Große Wirkung“ - David Nelles und Christian Serrer
- Abb. 12: der anthropogene Treibhauseffekt
    - https://studyflix.de/erdkunde/treibhauseffekt-einfach-erklart-3810 (zuletzt aufgerufen: 08.01.2023 09:42)
- Abb. 13: Anstieg der Temperatur vom Beginn der Industrialisierung bis heute
    - „Kleine Gase- Große Wirkung“ - David Nelles und Christian Serrer
- Abb. 14: Vergleich der infrarotreflektierenden Farbe mit handelsüblicher Farbe
    - https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666386420302368?via%3Dihub
- Abb. 15: PMMA in Aceton aufgelöst (eigene Fotografie)
- Abb. 16: 1. Versuchsaufbau (eigene Fotografie)
- Abb. 17: Messungen der Oberflächentemperatur (eigene Tabelle)
- Abb. 18: Graphische Darstellung der Messergebnisse (eigene Darstellung)
- Abb. 19: Oberflächentemperaturänderung innerhalb von 20 Minuten (eigene Darstellung)
- Abb. 20: Oberflächentemperaturänderung innerhalb von 60 Minuten
- Abb. 21: 2. Versuchsaufbau (1) (eigene Fotografie)
- Abb. 22: 2. Versuchsaufbau (2) (eigene Fotografie)
- Abb. 23: Screenshot Sensorprotokoll während des Versuchs innerhalb des Hauses (eigene Fotografie)
- Abb. 24: Wärmebild 0 min (eigene Fotografie)
- Abb. 25: Wärmebild nach 10 min (eigene Fotografie)
- Abb. 26: Wärmebild nach 20 min (eigene Fotografie)
- Abb. 27: Wärmebild nach 30 min (eigene Fotografie)
- Abb. 28: Graphische Darstellung der Innenraumtemperatur im Haus (eigene Darstellung)
- Abb. 29: Innenraumtemperaturänderung innerhalb von 60 Minuten (eigene Darstellung)
- Abb. 30: Graphische Darstellung der Innenraumtemperatur im Haus (eigene Darstellung)
- Abb. 31: Luftfeuchtigkeitsänderung innerhalb von 60 Minuten (eigene Darstellung)

8. Quellenangaben

- Absorption und Reflektion:
  - https://www.leifiphysik.de/optik/lichtausbreitung/grundwissen/stoffverhalten (zuletzt abgerufen 05.01.2023 23:10 Uhr)
  - „Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik“ - Verlag Moderne Industrie, 1979-1981
- Der Albedo – Effekt:
  - https://de.m.wikipedia.org/wiki/Eis-Albedo-R%C3%BCckkopplung (zuletzt aufgerufen 06.01.2023, 00:10 Uhr)
  - https://de.m.wikipedia.org/wiki/Albedo (zuletzt aufgerufen 06.01.2023 00:07 Uhr)
  - „Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik“ - Verlag Moderne Industrie, 1979-1981
  - https://studyflix.de/erdkunde/albedo-5698 (zuletzt aufgerufen 06.01.23 01:27 Uhr)
- Treibhauseffekt:
  - https://de.wikipedia.org/wiki/Treibhausgas (zuletzt aufgerufen: 08.01.2023 10:02)
  - https://studyflix.de/erdkunde/treibhauseffekt-einfach-erklart-3810 (zuletzt aufgerufen: 08.01.2023 09:42)
  - „Kleine Gase- Große Wirkung“ - David Nelles und Christian Serrer
- Thermochrome Farbe:
  - https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Thermochromie (zuletzt aufgerufen: 14.01.23 14:20 Uhr)
- Infrarotreflektive Farbe:
  - https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666386420302368?via%3Dihub (zuletzt aufgerufen: 14.01.23 16:02 Uhr)
  - https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435118304689 (zuletzt aufgerufen: 14.01.23 16:04 Uhr)
  - https://www.mdpi.com/2073-4352/8/9/333/htm (zuletzt aufgerufen: 14.01.23 16:07 Uhr)
  - https://www.proceedings.iaamonline.org/article/vpoam-2021-0149 (zuletzt aufgerufen: 14.01.23 16:14 Uhr)
  - https://www.skycoolsystems.com/ (zuletzt aufgerufen: 14.01.23 16:19 Uhr)
  - https://www.radi-cool.com.my/media (zuletzt aufgerufen: 14.01.23 16:25 Uhr)
  - https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666386420302368?via%3Dihub (zuletzt aufgerufen: 14.01.23 15:10 Uhr)
- Raumklima:
  - https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#hochster-anteil-am-energieverbrauch-zum-heizen (zuletzt abgerufen 04.04.2023 12:14 Uhr)
- Städtisches Mikroklima:
  - https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news/cities-are-often-10-15-degc-hotter-their-rural-surroundings-2022-07-25_en (zuletzt abgerufen 02.04.2023 16:33 Uhr)
- Erderwärmung:
  - https://climate.nasa.gov/interactives/global-ice-viewer/#/ (zuletzt abgerufen 3.04.2023 13:56 Uhr)
  - https://ourworldindata.org/how-urban-is-the-world (zuletzt abgerufen 6.04.2023 12:27 Uhr)