

## Passivhaus-Modelle

Stephanie Braun \* und Jan-Peter Meyn \*

\*Didaktik der Physik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

[jan-peter.meyn@physik.uni-erlangen.de](mailto:jan-peter.meyn@physik.uni-erlangen.de)

### Kurzfassung

Ein Passiv-Haus basiert auf einer effektiven Nutzung interner Wärmequellen, wie der Abwärme durch Bewohner und Haushaltsgeräte, sowie der solaren Gewinne, bei zugleich stark reduzierten Transmissionsverlusten. Die Heizung kann somit auf ein Minimum reduziert werden. Mit einem einfachen Modell aus dem weitverbreiteten Styropor und Fermacell wird schüleradäquat das Prinzip der Wärmetransmission veranschaulicht. Mit Hilfe der Simulationssoftware Stella wird die Wärmetransmission mit zeitabhängiger Heizung simuliert. Die graphische Benutzeroberfläche ermöglicht Schülern, auch ohne detaillierte Kenntnis der mathematischen Grundlagen, komplizierte Phänomene zu analysieren und umzusetzen. Der Vergleich der Simulation und der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung des Modellhauses zeigte eine sehr gute Übereinstimmung. Die verringerten Temperaturschwankungen, wie sie auch am Modell belegt werden konnten, und der damit verbundene Komfortgewinn sind neben dem geringeren Energieaufwand wichtige Merkmale des Passiv-Hauses.

### 1. Einleitung

Energie wird für die Ausgestaltung des modernen, industriellen Lebens genutzt. Dabei entstehen bedrohlich Umweltschäden durch Verstärkung des Treibhauseffektes, durch Freisetzung radioaktiver Stoffe und durch eine Vielzahl weiterer Schadstoffe. Die effiziente Nutzung von Energie ist ein epochaltypisches Problem im Sinne von Klafki [1] und muss daher im Schul-Unterricht verankert sein. Das Passivhaus ist ein lebensnahes und leicht verständliches Beispiel, wie Energie eingespart werden kann. In Deutschland werden 20 Prozent der Primärenergie für die Raumheizung aufgewendet. Diesen Aufwand könnte man fast vollständig einsparen.

Schülerinnen und Schüler kennen das Prinzip der Thermoskanne aus dem Alltag. Entsprechend kann man durch eine gute Isolation erreichen, dass Wärme nicht aus dem Haus entweicht und somit die Raumtemperatur ohne Heizung auf einem angenehmen Niveau bleiben kann.

Das Passivhaus-Modell erlaubt einen handlungsorientierten Zugang zum Thema Wärmeleitung. Darüber hinaus ist es ein gutes Objekt, die Modellbildung [2] selbst ins Zentrum des Unterrichts zu nehmen.

Physikalisch gesehen ist das Modell ein Experiment zur Wärmeleitung [3], [4], [5], [6].

### 2. Konstruktionsmerkmale Passivhaus

In der Realität ist das Passivhaus als komplexes technisches System angesehen. Das Grundprinzip ist jedoch sehr einfach und wird für den Fall niedriger Außentemperatur (Winter) kurz

skizziert. Durch eine möglichst gute thermische Isolation wird der Wärmestrom nach Außen stark vermindert. Der notwendige Luftaustausch wird nicht über geöffnete Fenster, sondern über einen Gegenstromwärmetauscher bewerkstelligt. Dabei wird der Luftstrom weitgehend vom Wärmestrom gestrennt, letzterer wird gegenüber der Fensterlüftung um einen Faktor 20 reduziert. Da der Abstrom von Wärme nicht ganz verhindert werden kann, nutzt man den Zufluss von Wärme durch große Fenster mit vorwiegend südlicher Ausrichtung und durch innere Quellen. Im hiesigen Klima ist dennoch eine Zusatzheizung notwendig, und hierzu gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, die das Grundprinzip kompliziert erscheinen lassen. Mit den drei genannten Basiskomponenten wird die zum Heizen notwendige Energiemenge gegenüber dem Durchschnittswert für Wohnungen um einen Faktor zehn reduziert.

### 3. Hausmodell

Von den drei Komponenten Isolation - Luftaustauscher - Lichteinfang wird die erste Komponente im Modell untersucht. Wir verwenden einen geschlossenen, würfelförmigen Kasten mit 200mm Kantenlänge, hergestellt aus Baumaterial. Der Kasten ist zweischichtig. Die innere Schicht besteht aus 10mm Fermacellplatte [7], die äußere Schicht besteht aus 30mm Styroporplatte, siehe Abbildung 2. Dieser Aufbau ist entscheidend für die Funktion: Die Fermacellschicht stellt ein Wärmereservoir mit homogener Temperatur dar. Der Wärmewiderstand innerhalb der Fermacellstruktur ist etwa zehn mal kleiner als in der Isolationschicht. Die Wärmekapazität der Isolation wegen deren geringer Masse kaum ins Gewicht. Es liegt also

ein homogener Körper vor, dessen Wärme über einen Wärmewiderstand in radialer Richtung in die Umgebung abfließt. Der zweischichtige Aufbau entspricht der Praxis im Hausbau. Es gibt zwar alternative Konzepte wie Holzständerbauweise oder auch die massive Holzwand, die jedoch aus thermodynamischer Sicht nicht optimal sind. Für die letztgenannten Konstruktionen kann es andere Gründe geben wie Erdbebensicherheit, nachwachsende Rohstoffe, etc.

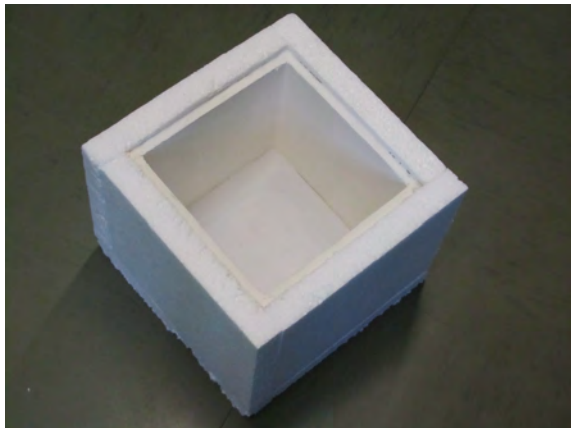


Abb. 1: Kasten aus Fermacell und Styropor, Deckel abgenommen.

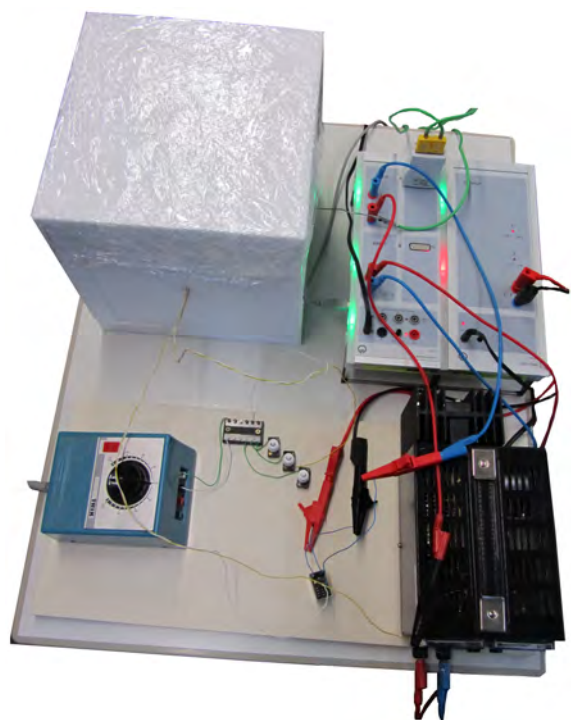


Abb. 2: Modellsystem mit Elektrizitätsversorgung und Messwerterfassung.

Der Kasten wird im Innern durch eine Glühbirne mit 5 Watt Leistung beheizt. Auch die Heizung ist

authentisch, denn im Passivhaus stellen elektrische Geräte neben den Bewohnern selbst die wichtigsten Wärmequellen dar. Die Temperatur wird mit einem Thermoelement, Typ K, gemessen.

Die Messungen werden verglichen mit einer Simulation in Stella [8], einer Modellierungssoftware, die bereits erfolgreich in Schulen eingesetzt wurde [9].

#### 4. Thermodynamische Untersuchungen

Zur Überprüfung, ob die oben getroffene Annahme einer eindimensionalen (radialen) Wärmeleitung realistisch ist, würde das Modell über einen längeren Zeitraum aufgeheizt und dann sich selbst überlassen. Die Innentemperatur fällt nach einem Exponentialgesetz (Abbildung 3, was der Erwartung entspricht). Vergleichsmessungen mit einer Styroporbox ohne Fermacell-Einlage ergab eine stark abweichende Charakteristik. Es ist also wichtig, dass die Wärmekapazität der eingeschlossenen Materie gegenüber der Wärmekapazität der Hülle dominiert.

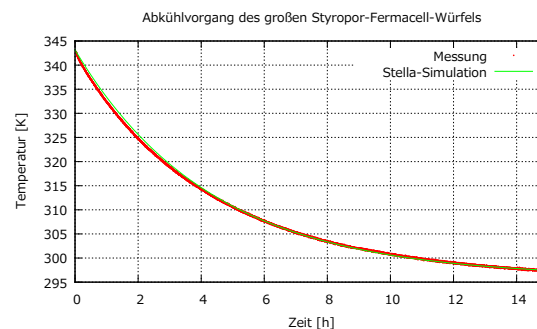


Abb. 3: Innentemperatur als Funktion der Zeit nach Abschalten der Heizung.

Im realen Passivhaus ist der Wärmeeintrag nicht konstant, sondern periodisch. Die Sonne scheint nur tagsüber, und auch die elektrischen Haushaltsgeräte werden vorwiegend tagsüber genutzt. Im Modell die Heizung in gleichen Abständen an- und ausgeschaltet, und zwar mit 8 Stunden Periode. Den Verlauf der Innentemperatur zeigt Abbildung 4. Die Messung stimmt nicht ganz mit der Stella-Simulation überein und zwar wegen der variablen Umgebungstemperatur. Misst man an Stelle der Temperatur im Kasten die Differenz zwischen Innen- und Außentemperatur, so erhält man die sehr gute Übereinstimmung in Abbildung 5.

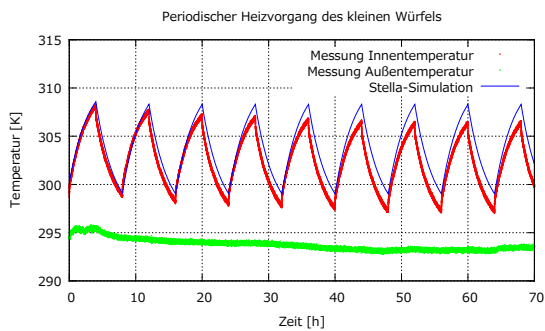


Abb. 4: Innentemperatur als Funktion der Zeit mit periodischer Heizung.

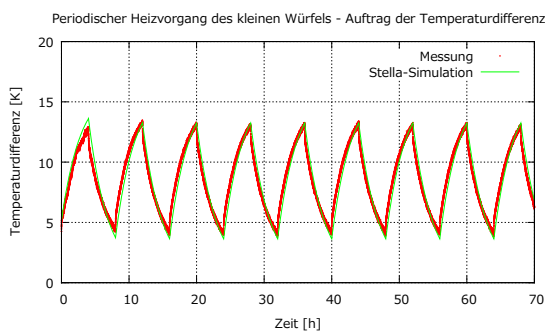


Abb. 5: Differenz zwischen Innen- und Außentemperatur als Funktion der Zeit mit periodischer Heizung.

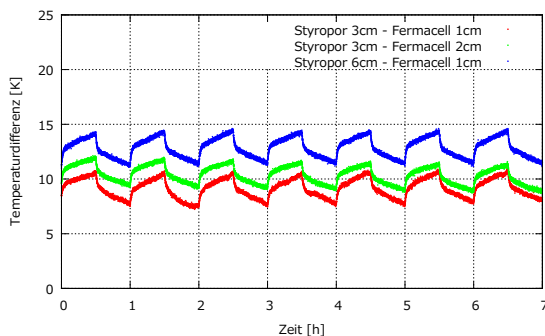


Abb. 6: Nicht-exponentieller Zerfall bei sehr kurzer Periode des zyklischen Heizens. Eine zusätzliche Fermacellschicht verringert die Amplitude der Temperaturschwankung; man erkennt auch eine leichte Erhöhung der mittleren Temperatur durch den zusätzlichen Wärmewiderstand. (grüne Kurve vs. rote Kurve). Die Verdopplung der Isolierschicht (blaue Kurve) hat erwartungsgemäß einen viel größeren Einfluss auf die mittlere Temperatur.

Die Grenzen des Modells zeigen sich bei Verkürzung

der Heizperiode von 8 Stunden auf 1 Stunde durch nicht-exponentielle Änderung der Temperatur, siehe Abbildung 6.

Die Erhöhung der Temperaturdifferenz nach Vergrößerung des Wärmewiderstands ist physikalisch einleuchtend und beispielsweise analog zur Erhöhung der Spannung bei Vergrößerung eines Widerstands im elektrischen Stromkreis. Im realen Passivhaus strebt man nicht die Erhöhung der Raumtemperatur an, sondern das Absenken der Heizleistung bei einer gegebenen Raumtemperatur. Die Simulation mit Stella ist in Abbildung 7 gezeigt. Ein sehr wichtiges Resultat ist die Abnahme der Amplitude der Temperaturschwankungen. Durch die Verdopplung der Isolationsschicht hat man diesbezüglich den gleichen Vorteil wie bei einer Verdopplung der Wärmekapazität durch dickere Innenwände. Das Passivhaus ist also nicht nur energieeffizient, sondern auch besonders komfortabel.

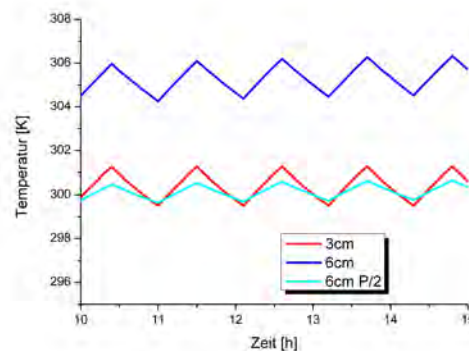


Abb. 7: Stella-Simulation für Verdopplung des Wärmewiderstands durch zusätzliche Styroporschicht bei voller Heizleistung (blaue Kurve) und halber Heizleistung (hellblaue Kurve). Der Vorteil der stärkeren Isolation ist zweifach. Neben der Einsparung von Energie verringert sich die Schwankung der Raumtemperatur.

## 5. Möglicher Einsatz im Unterricht

Genauere Messungen erfordern Schaltzeiten von etwa 4 Stunden, die Aufnahme einer ganzen Messkurve dauert mehrere Tage. Das scheint zunächst ein Ausschlusskriterium für den Einsatz im Unterricht zu sein. Andererseits ist die sorgfältige Planung und die ferngesteuerte Durchführung von Experimenten charakteristisch für die moderne Physik, man denke nur an satellitengestützte Experimente. In dem vorgestellten Modell ist die elektronische Steuerung zwingend notwendig und nicht nur eine Spielerei. Es wäre möglich, das Modell weiter zu miniaturisieren, doch würde dann ein Wesensmerkmal des Passivhauses, nämlich der hohe Komfort durch sehr langsame Temperaturänderung, verschleiert werden. Die Simulation

mit Stella ist für die Verdeutlichung der thermodynamischen Zusammenhänge nicht notwendig, man kann mit dem Modell ganz praxisorientiert arbeiten.

## 6. Zusammenfassung

Das Passivhaus-Modell aus authentischen Bauwerkstoffen zeigt das erwartete Verhalten bei zyklischer Beheizung, nämlich die Zunahme der mittleren Innentemperatur nach Verstärkung der Isolationschicht, bzw. die Abnahme der Temperaturamplitude bei verringerter Heizleistung. Der gemessene Temperaturverlauf stimmt bei sehr gut mit der eindimensionalen Simulation überein, sofern die Schaltzyklen der Heizung einige Stunden betragen. Das Modell verdeutlicht die erstaunliche Tatsache, das Energiesparen und Komfortgewinn gemeinsam zu erreichen sind.

## 7. Literatur

- [1] Wolfgang Klafki. *Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik*. Beltz, Weinheim und Basel, 1996.
- [2] Silke Mikelskis-Seifert, Marco Thiele, und Thilo Wünscher. Modellieren – Schlüsselfähigkeit für physikalische Forschungs- und Lernprozesse. *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 72 (9):1210–1219, 2004.
- [3] C. H. Shaw and Norman Saunders. Intermediate laboratory experiment in heat conduction. *American Journal of Physics*, 23(2):89–90, 1955.
- [4] Gregory Bee, Katherine Ballentine, and Marshall Thomsen. Realistic problems involving thermal conductivity. *American Journal of Physics*, 76(10):970–974, 2008.
- [5] M Vollmer. Newton’s law of cooling revisited. *European Journal of Physics*, 30(5):1063, 2009.
- [6] M. Ortu no, A. Márquez, S. Gallego, C. Neipp, and A Beléndez. An experiment in heat conduction using hollow cylinders. *European Journal of Physics*, 32(4):1065, 2011.
- [7] Fermacell GmbH, Düsseldorfer Landstraße 395, 47259 Duisburg. [www.fermacell.de](http://www.fermacell.de).
- [8] [www.iseesystems.com/software/Education/StellaSoftware.aspx](http://www.iseesystems.com/software/Education/StellaSoftware.aspx)
- [9] Thomas Borer, Peter Frommenwiler, Hans U. Fuchs, Herrmann Knoll, Gabor Kopacsy, Werner Mauerer, Edy Schütz, und Kurt Studer. *Physik - Ein systemdynamischer Zugang für die Sekundarstufe II*. hep Verlag, Bern, 2005.