

# Kapitel 1

## Einleitung

Aufgrund der begrenzten Reserven an fossilen Energieträgern ist die Menschheit dringend auf neue Energiequellen angewiesen. Abbildung 1.1 zeigt den bisherigen und prognostizierten weltweiten Erdölverbrauch aufgetragen über der Zeit. Die Fläche unter der Kurve entspricht der geschätzten Gesamtmenge der förderbaren Ölvorräte. Photovoltaik hat das Potenzial, einen substanziellen Beitrag zur Energieversorgung zu leisten. Obwohl zur Zeit nur ein verschwindend geringer Teil des weltweiten

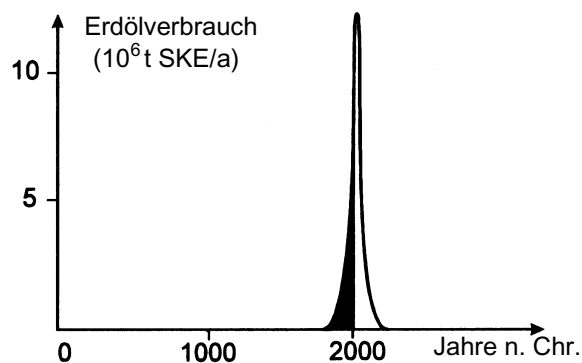


Abbildung 1.1: Weltweiter Erdölverbrauch aufgetragen über der Zeit (aus [Wür00])

Energieverbrauchs durch Photovoltaik gedeckt wird ( $<0,01\%$  des Weltenergieverbrauchs [sol06]), zeigen die enormen Wachstumsraten (über  $40\%$  Wachstum der jährlich installierten Leistung in den letzten zehn Jahren [iea06]), dass ihre Bedeutung kontinuierlich zunimmt. Deutschland nimmt dabei als größter Markt eine Vorreiterstellung ein. 2005 wurden bereits  $1,264\text{GWh}$  Strom aus netzgekoppelten Photovoltaikanlagen gewonnen, dies entspricht  $0,26\%$  der Gesamtstromproduktion [Kre06]. Um den Anteil weiter zu steigern, ist eine weitere Reduktion der Herstellungskosten von Photovoltaikanlagen wünschenswert.

Da die Herstellung von siliziumbasierten Solarzellen relativ aufwendig ist, ist eine signifikante Senkung der Produktionskosten für diese Art von Solarzellen nicht zu erwarten. Als Alternative existieren verschiedene Typen von so genannten Dünnschichtsolarzellen. Diese besitzen nur eine geringe Dicke an absorbierendem Material (in der Regel  $2$  bis  $4\mu\text{m}$ ) und lassen sich dadurch mit geringerem Materialeinsatz herstellen.  $\text{CuGaSe}_2$  gehört zur Familie der Chalkopyrite und ist ein vielversprechendes Material für die Herstellung solcher Zellen. Bisher werden Chalkopyrit-Dünnschicht-Solarzellen industriell aus dem Mischmaterial  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  oder seit Neuestem auch aus  $\text{CuInGaS}_2$  [Mey06] hergestellt. Im Folgenden wird der Begriff Chalkopyrit synonym mit dem  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ -System verwendet.

$\text{CuGaSe}_2$  besitzt eine relativ große Bandlücke von  $1,7\text{eV}$ , die es als Material für die Topzelle in einer Tandemkonstruktion prädestiniert. In solch einer Anordnung absorbiert die Topzelle den kurzwelligeren Anteil des Lichtes, während der langwellige Anteil transmittiert und von einer weiteren Zelle (Bottomzelle) absorbiert wird.

Im Labor werden für Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>-Zellen Wirkungsgrade von 19,5% erreicht [Con05]. Modul-Wirkungsgrade erreichen 13% [Pow04][Tan01]. Für Silizium werden dagegen 24,7% für einzelne Zellen erreicht und kommerziell erhältliche Module besitzen Wirkungsgrade von bis zu 17,4% [san07]. Der Nachteil des geringeren Wirkungsgrades der Chalkopyrit-Dünnschicht-Solarzellen wird aber durch ihre geringeren Produktionskosten wieder wettgemacht.

Eine Spezialanwendung, in der die Verwendung von Chalkopyrit-Dünnschicht-Solarzellen klare Vorteile erbringt, ist die Energieerzeugung im Weltraum. Chalkopyrit-Dünnschicht-Solarzellen zeigen eine bemerkenswerte Stabilität gegenüber kosmischer Strahlung [Bur88][Jas01] und erlauben gleichzeitig die Verwendung von Metall- und Polymerfolien als Substrate, wodurch ein sehr gutes Verhältnis von Leistung zu Gewicht erreicht wird (bis zu 1400W/kg [Tut00]).

Trotz der langen Zeit [Wag75], seit der Chalkopyrite erforscht werden, ist das Verständnis des elektrischen Transports in Chalkopyrit-Schichten noch sehr begrenzt. Dies liegt vor allem daran, dass die meisten Arbeiten aus empirischen Untersuchungen an fertigen Zellen bestehen und nur wenige Untersuchungen der reinen Materialeigenschaften existieren. Diese Arbeit soll zu einem tieferen Verständnis der physikalischen Grundlagen von Chalkopyrit-Dünnschicht-Solarzellen beitragen.

Als Methode zur Untersuchung des elektrischen Transportes in Schichtsystemen eignet sich im besonderen Maße der Hall-Effekt, da durch dessen Messung sowohl die Dichte der Ladungsträger in der Schicht als auch ihre Beweglichkeit bestimmt werden können.

Die Arbeit besitzt folgenden Aufbau:

- **Kapitel 2** behandelt die Grundlagen der Solarzellen und des Chalkopyritmaterials. Im ersten Teil werden die Grundgrößen Kurzschlussstromdichte, offene Klemmspannung und Füllfaktor eingeführt, Betrachtungen zur Abschätzung des maximal erreichbaren Wirkungsgrades angestellt und das Konzept der Tandemsolarzelle erläutert. Darauf folgend werden die physikalischen Besonderheiten des Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>-Chalkopyritsystems aufgeführt. Der dritte Teil beschäftigt sich mit technologischen Details von Chalkopyrit-Dünnschicht-Solarzellen. Im letzten Teil wird kurz der aktuelle Wissensstand über die in den polykristallinen Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>-Solarzellen vorhandenen Korngrenzen rekapituliert.
- **Kapitel 3** geht auf die theoretischen Grundlagen des Ladungsträgertransports in Halbleitern ein. Besonderes Augenmerk wird auf die Grundlagen des Hall-Effektes und die Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgerdichte gelegt.
- **Kapitel 4** behandelt die Präparation der untersuchten Schichten. Die verwendeten Verfahren der Metallorganischen Gasphasen-Epitaxie und der Physikalischen Verdampfung (engl.: *physical vapour deposition, PVD*) werden vorgestellt. Die im Rahmen dieser Arbeit umgebauten PVD-Anlage wird detailliert beschrieben. Verwendete Methoden zur Analyse der Schicht-Morphologie und -Zusammensetzung (REM / EDX und RFA) werden erklärt.
- **Kapitel 5** geht auf Besonderheiten der Messmethode und des Versuchsaufbaus ein. Der Einfluss verschiedener Fehlerquellen wird abgeschätzt.
- **Kapitel 6** beschäftigt sich mit MOVPE-gewachsenen, epitaktischen CuGaSe<sub>2</sub>-Schichten.
- **Kapitel 7** präsentiert die Ergebnisse für mittels physikalischer Verdampfung gewachsener polykristalliner CuGaSe<sub>2</sub>-Schichten. Hierbei interessiert insbesondere der Einfluss von Natrium auf die Transporteigenschaften.
- **Kapitel 8** zeigt Photo-Hall-Messungen an epitaktischen CuGaSe<sub>2</sub>-Schichten. Die Auswirkungen der Beleuchtung auf die temperaturabhängige Ladungsträgerdichte werden diskutiert.
- **Kapitel 9** präsentiert Photo-Hall-Messungen an polykristallinen CuGaSe<sub>2</sub>-Schichten.

- **Kapitel 10** gibt eine Zusammenfassung der Arbeit und zeigt mögliche Richtungen für weitere Untersuchungen auf.
- Im **Anhang** finden sich ausgewählte Literaturwerte für in dieser Arbeit verwendete Materialien. Weiterhin sind die wichtigsten Programmroutinen für die Simulation der temperaturabhängigen Ladungsträgerdichte sowie eine Auswahl einzelner Messungen abgedruckt.

