

Measuring And Optimizing Energy Consumption Of Verification Work

Bachelor Thesis Presentation

Maximilian Hailer

LMU Munich, Germany

30.10.2019 12:30 Uhr



Agenda

1. Motivation
2. Data Management
3. Messtechniken
4. Optimierung
5. Fazit

1.1 Motivation

Wir leben im 21. Jahrhundert, dem
Informationszeitalter!

1.1 Motivation

- ▶ Software ist heutzutage in vielen Branchen nicht mehr wegzudenken!
- ▶ Um so wichtiger ist deshalb die Zuverlässigkeit von Software sicherzustellen
- ▶ Dabei gibt es zwei Ansätze: **Testen** und **Verifikation!**
- ▶ Wir wollen uns hier auf Verifikation beschränken
- ▶ Verifikation von umfangreicher und/oder komplexer Software benötigt viele Rechenressourcen
- ▶ Rechenressourcen benötigen Energie zum Betrieb

1.2 Motivation - Ziel

Wir wollen den Energieverbrauch von Clustern bei der Software Verifikation mindern!

1.3 Motivation - Gründe

1. Geringere Betriebskosten (Energie wird pro kWh verrechnet)
2. Bessere Ökobilanz (da mehr als 50% des Strommix Deutschlands sich durch Verbrennung fossiler Energieträger zusammensetzt, Stand 2017)

1.4 Motivation - Kompromiss

Wir wollen bei gleichbleibender
Cluster-Rechenleistung, den
Energieverbrauch reduzieren und somit die
Energieeffizienz erhöhen!

2.1 Data Management - Daten

- ▶ Wir arbeiten mit Datenpunkten!
- ▶ Diese setzen sich aus Zeitpunkt und Energie- bzw. Leistungswert zusammen
- ▶ Gemessene Daten müssen gesammelt und verarbeitet werden, sodass sie für uns auswertbar sind

2.2 Data Management Übersicht

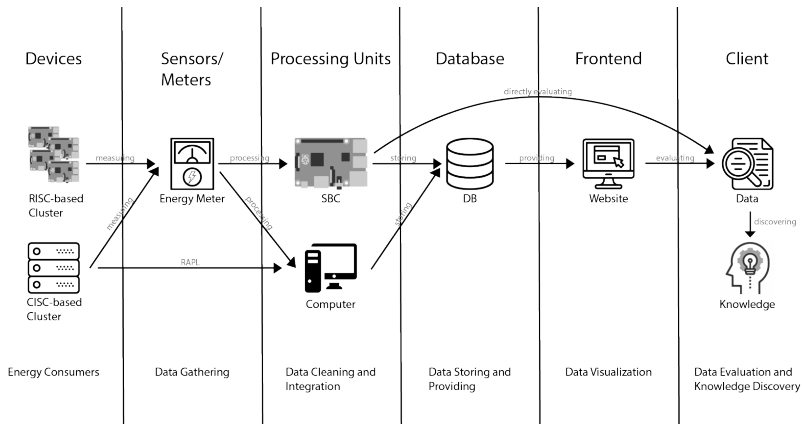


Figure: Datenflussdiagramm der Energiewerte vom Cluster, bis zur Wissensfindung.

2.2.1 Data Gathering

- ▶ **Tool unserer Wahl:** Vzlogger von Volkszaehler
- ▶ **Aufgabe:** Sammelt und interpretiert Energiedaten eines Stromzählers
- ▶ **Vorteile:**
 - ▶ Kompatibel mit den meisten deutschen smarten Energiezählern (SML, S0, ...)
 - ▶ Direkt kompatibel mit einigen DBs wie InfluxDB
 - ▶ Ressourcenarmer Betrieb → Läuft auch auf embedded devices
 - ▶ Open Source (<https://github.com/volkszaehler/vzlogger>)

2.2.2 Data Storing

- ▶ **Tool unserer Wahl:** InfluxDB
- ▶ **Aufgabe:** Speichert und verwaltet die erhaltenen Daten in einer Time Series DB (TSDB)
- ▶ **Vorteile:**
 - ▶ Optimiert für Time-Series Data
 - ▶ Kompatibel zu Vzlogger
 - ▶ SQL-like Query language mit einigen Komfortmethoden (Datenaggregation, Mathematische Funktionen, ...)
 - ▶ Open Source (<https://github.com/influxdata/influxdb>)

2.2.3 Data Visualization

- ▶ **Tool unserer Wahl:** Grafana
- ▶ **Aufgabe:** Stellt gespeicherte Daten aus InfluxDB oder anderen DBs visuell dar
- ▶ **Vorteile:**
 - ▶ Lehrstuhl nutzt bereits Grafana → Einheitlich
 - ▶ Viele verschiedene Visualisierungsansätze vorhanden (Graph, Heatmap, Histogram, ...)
 - ▶ Multi-Plattform kompatibel (Linux, Windows, macOS) sowohl Betrachten als auch Hosten
 - ▶ Plugin und Import Dashboard Support
 - ▶ Open Source (<https://github.com/grafana/grafana>)

3.1 Messtechniken - Ziel

Wir wollen die für uns beste Messtechnik ermitteln, um diese für spätere Analysen zu verwenden.

3.2 Messtechniken - Kriterien und Auswahl

| | |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Auswahl | Kriterien |
| Energiezähler (EM) Intel RAPL | Genauigkeit Plattformflexibilität Messaufwand |

Table: Links die Auswahloptionen die es zu testen gilt, rechts die Kriterien die zu berücksichtigen sind.

3.3.1 Energiezähler Messung

- ▶ Wir nutzen den Smart Energiezähler ED300L
- ▶ Datenaustausch via optischer Schnittstelle (IR)
- ▶ Mittels einem Lese-/Schreibkopf mit einem Raspberry Pi 3B+ verbunden
- ▶ Auf dem Raspberry Pi ist der in Abschnitt 2 genannte Data Management Stack aus Vzlogger + InfluxDB + Grafana installiert

3.3.2 RAPL

- ▶ Intel RAPL = Running Average Power Limit
- ▶ Softwarebasierte Energiemessung mittels Hardware-Features
- ▶ Verfügbar nur für Intel CPUs ab der Sandy Bridge Architektur

3.3.2 RAPL Fortsetzung

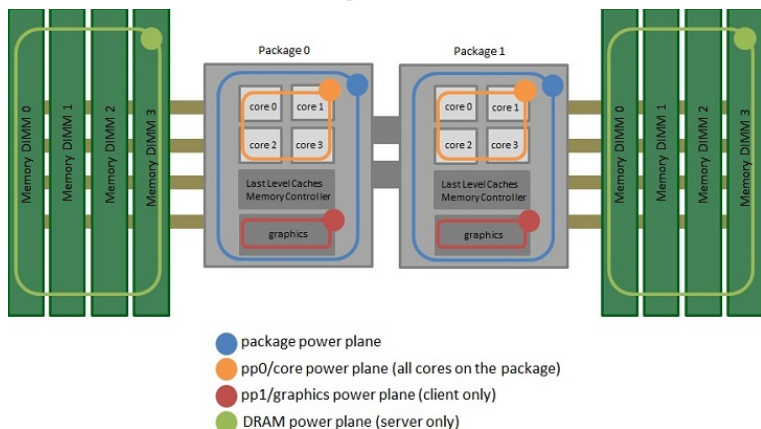


Figure: Beispiel Schema einer Multi CPU, welche die lesbaren RAPL Domänen zeigt. Quelle:

<https://software.intel.com/en-us/articles/intel-power-governor>
(Letzter Zugriff: 21.10.2019)

3.4 Messtechniken - Testbedingungen

- ▶ Apollon Cluster
- ▶ Intel Xeon E3-1230 v5
getaktet auf 3.40 GHz
- ▶ 33 GB RAM
- ▶ 168 Rechner
- ▶ OS: Ubuntu 18.04
- ▶ Software: VerifierCloud 0.700-207 und CPAchecker 1.8

3.5.1 Idle Test

| Idle Power Usage | | | |
|------------------|-------------|------------------|------------------|
| Testing Method | Duration | Avg. Power Usage | Difference to EM |
| EM | 8 h 0 m 0 s | 2.86 kW | 0 W |
| Intel RAPL | 8 h 0 m 0 s | 445 W | 2.42 kW |

Table: Vergleich der Messtechniken Energy Meter (EM), Intel RAPL.

3.5.2 Idle Test - EM

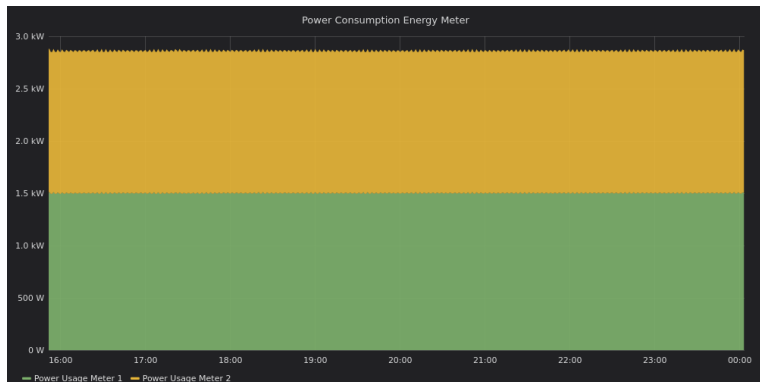


Figure: Leistungsgraph ermittelt mit dem Stromzähler. Dieser zeigt einen fast konstanten Verlauf innerhalb eines 8 h Intervalls.

3.5.3 Idle Test - RAPL

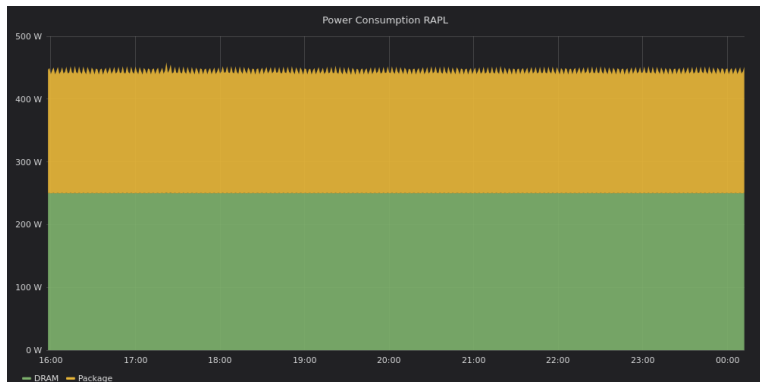


Figure: Leistungsgraph ermittelt mit RAPL. Dieser zeigt einen fast konstanten Verlauf innerhalb eines 8 h Intervalls.

3.6.1 Variable Load Test

| Variable Load Power Usage | | | | |
|---------------------------|--------------|------------------|------------------|---------------------|
| Testing Method | Duration | Avg. Power Usage | Difference to EM | Std. of diff. to EM |
| EM | 14 h 0 m 0 s | 3.81 kW | 0 W | 0 W |
| RAPL | 14 h 0 m 0 s | 1.27 kW | 2.53 kW | 355 W (14%) |

Table: Vergleich der Messtechniken Energy Meter (EM) und Intel RAPL gemischt zwischen idle state und svcomp19 workload beim Apollon Cluster.

3.6.2 Variable Load Test - EM

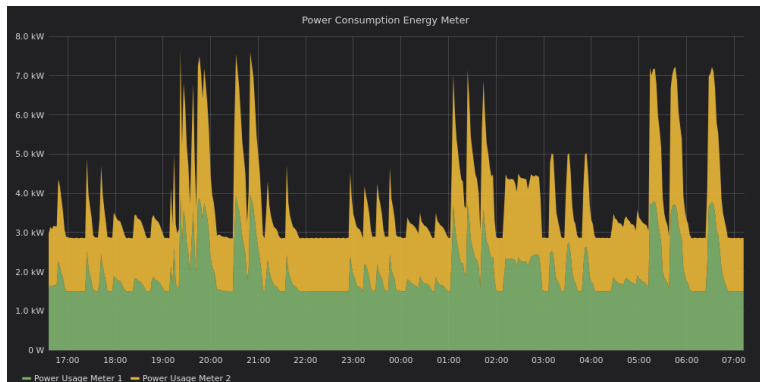


Figure: Leistungsgraph ermittelt mit dem Stromzähler, innerhalb eines 14 h Intervalls.

3.6.3 Variable Load Test - RAPL

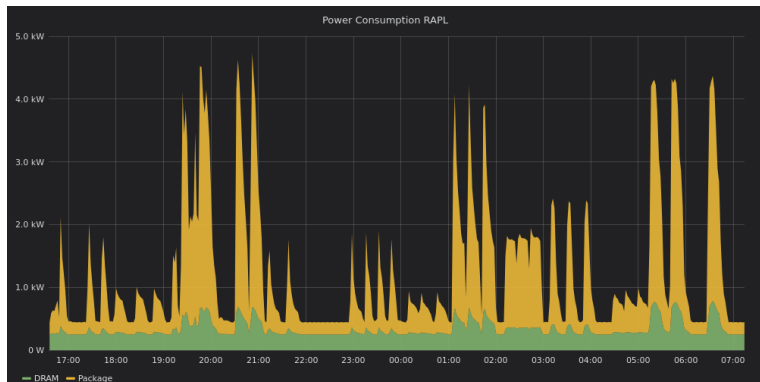


Figure: Leistungsgraph ermittelt mit RAPL, innerhalb desselben 14 h Intervalls.

3.7 Einschub: Constant Load Test

| Constant Load Power Usage | | | |
|---------------------------|-------------|------------------|------------------|
| Testing Method | Duration | Avg. Power Usage | Difference to EM |
| EM | 8 h 0 m 0 s | 5.82 kW | 0 W |
| Intel RAPL | 8 h 0 m 0 s | 3.03 kW | 2.79 kW |

Table: Vergleich der Messtechniken zwischen Energy Meter (EM) und Intel RAPL bei konstanter Arbeitslast durch svcomp19 Tests auf dem Apollon Cluster.

3.8 Messtechniken - Vergleich

| Variable Load Power Usage | | | |
|---------------------------|--------------|---------------|-------|
| Testing Method | Error Margin | Compatibility | Costs |
| EM | 3.6% | ++ | - |
| RAPL | n.a. | - | ++ |

Table: Vergleich der Messtechniken Energy Meter (EM) und Intel RAPL.

4.1 Optimierung - Ziel

- ▶ Wir wählen einen Hardware Optimierungsansatz
- ▶ Dabei nutzen wir eine andere CPU Architektur: ARM Prozessoren (Cortex A53 Allwinner)
- ▶ Diese haben eine geringere Taktrate und einfachere Transistorlogik (RISC Architekturansatz)
- ▶ Das führt zu einer reduzierten Energieaufnahme im Vergleich zu den verbauten Intel Prozessoren im Apollon Cluster

4.2 Hardwarespezifikationen

▶ **Pine Cluster**

- ▶ A64 Quad Core SOC getaktet auf 1.1 GHz
- ▶ 2 GB LPDDR3 RAM
- ▶ 7 Rechner
- ▶ OS: Ubuntu 18.04
- ▶ Software: VerifierCloud und CPAchecker 1.8

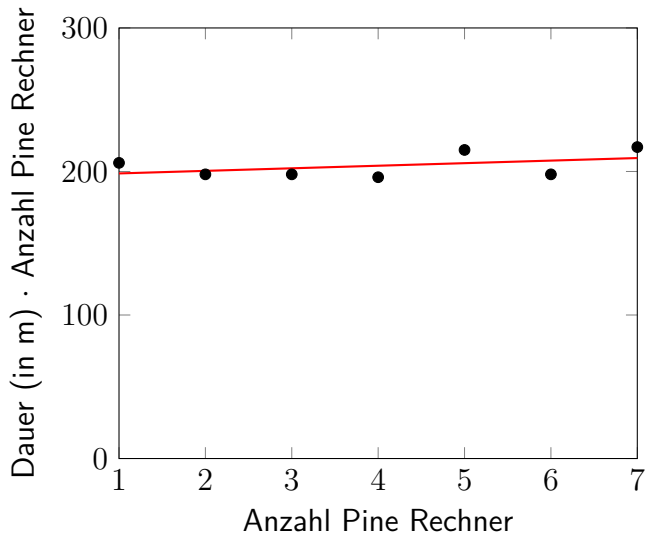
▶ **Apollon Cluster**

- ▶ Intel Xeon E3-1230 v5 getaktet auf 3.40 GHz
- ▶ 33 GB RAM
- ▶ 168 Rechner
- ▶ OS: Ubuntu 18.04
- ▶ Software: VerifierCloud und CPAchecker 1.8

4.3 Test Bedingungen

- ▶ Test Sets: svcomp19–overflows, -memsafety, -termination und -reachsafety (reduced)
 - ▶ Reachsafety Zusammensetzung: ArraysReach, ControlFlow, HeapReach, Recursive, und Loops
- ▶ Zeitlimit: 900s
- ▶ Memory Limit: 1.1 GB und 750 MB Java Heap
- ▶ Falls SMTInterpol verwendet wurde, dann zusätzlich auch eine Integer/Float Repräsentation für Bitvektoren

4.4.1 Pine Efficiency Scaling Test (Overflows)



4.4.2 Energy Consumption with SMTInterpol

| Pine Energy Consumption with SMTInterpol and 1.1GB Test | | | | |
|---------------------------------------------------------|----------------|---------------|-----------|---------------|
| Test | Duration | Energy needed | Score | (cor,inc,unk) |
| Overflows | 30 m 58 s | 10.7 Wh | -2970/691 | (243/203/5) |
| Memsafety | 02 h 55 m 27 s | 59.9 Wh | 349/753 | (251/1/223) |
| Termination | 01 h 15 m 11 s | 23.8 Wh | 301/443 | (177/1/72) |
| Reachsafety | 10 h 12 m 50 s | 201 Wh | -370/1534 | (448/67/384) |

| Apollon Energy Consumption with SMTInterpol and 1.1GB Test | | | | |
|------------------------------------------------------------|-----------|---------------|-----------|---------------|
| Test | Duration | Energy needed | Score | (cor,inc,unk) |
| Overflows | 37 s | 36.4 Wh | -3000/691 | (245/205/1) |
| Memsafety | 14 m 50 s | 862 Wh | 351/753 | (252/1/222) |
| Termination | 14 m 51 s | 792 Wh | 311/443 | (184/1/65) |
| Reachsafety | 17 m 13 s | 1.65 kWh | -333/1534 | (483/69/347) |

4.4.3 Energy Consumption with MathSAT5 and more RAM

| Pine Energy Consumption with SMTInterpol and 1.1GB Test | | | | |
|---------------------------------------------------------|----------------|---------------|-----------|---------------|
| Test | Duration | Energy needed | Score | (cor,inc,unk) |
| Overflows | 30 m 58 s | 10.7 Wh | -2970/691 | (243/203/5) |
| Memsafety | 02 h 55 m 27 s | 59.9 Wh | 349/753 | (251/1/223) |
| Termination | 01 h 15 m 11 s | 23.8 Wh | 301/443 | (177/1/72) |
| Reachsafety | 10 h 12 m 50 s | 201 Wh | -370/1534 | (448/67/384) |

| Apollon Energy Consumption with MathSAT5 and 15GB RAM Test | | | | |
|------------------------------------------------------------|-----------|---------------|----------|---------------|
| Test | Duration | Energy needed | Score | (cor,inc,unk) |
| Overflows | 15 m 06 s | 1.10 kWh | 109/691 | (297/20/134) |
| Memsafety | 14 m 54 s | 1.00 kWh | 355/753 | (254/1/220) |
| Termination | 14 m 54 s | 810 Wh | 321/443 | (179/0/71) |
| Reachsafety | 25 m 05 s | 2.24 kWh | 724/1534 | (501/5/393) |

5 Fazit

- ▶ ARM Prozessoren haben das Potential wesentlich energieeffizienter zu sein (teilweise über Faktor 10)
 - ▶ Die verwendeten Softwarekomponenten müssen aber möglichst ARM kompatibel sein
- ▶ RAPL eignet sich zur Ermittlung der Leistungsaufnahme von CPU und RAM
 - ▶ Aber wegen weiterer Leistungskomponenten ungeeignet den Strombedarf des ganzen Systems zu extrapolieren

Quellen

- 1 B. Magnusson A. Menditto, M. Patriarca. Understanding the meaning of accuracy, trueness and precision. 2007.
- 2 I. Ozturk A. Rafindadi. Impacts of renewable energy consumption on the german economic growth: Evidence from combined cointegration test. In Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 75, pages 1130–1141, 2017.
- 3 A. Crane. Modernizing and protecting the electricity grid. In The Bridge - Linking Engineering and Society, page 3, 2010.
- 4 G. Calandrini et al. Power measurement methods for energy efficient applications. 2013.

Quellen Fortsetzung 1

- 5 M. Haenel et al. Measuring energy consumption for short code paths using rapl. In Measuring Energy Consumption for Short Code Paths Using RAPL, 2012.
- 6 Bundesministerium fuer Energie und Wirtschaft. Energietraeger. In Energiedaten: Gesamtausgabe, page 38, 2018.
- 7 Bundesamt fuer Sicherheit in der Informationstechnik. Teil b: "sml – smart message language". In Technische Richtlinie BSI TR-03109-1, 2013.
- 8 C. Plotzky J. Ganz, M. Beyer. Time-series based solution using influxdb. 2015.
- 9 EMH metering. Produkthandbuch fuer den elektronischen haushaltszaehler ed300l nach fnn lastenheft edl. 2010.

Quellen Fortsetzung 2

- 10 S. Yfantidou S. Naqvi. Time series databases and influxdb. 2017.
- 11 European Standard. Electricity metering equipment (a.c.) - particular requirements - static meters for active energy (class indexes a, b and c). In EN 50470-3:2006 European Standard, 2006.
- 12 N. Steinger. Measuring, visualizing, and optimizing the energy consumption of computer clusters. 2017.
- 13 P. Wendler. Towards practical predicate analysis. pages 171–172, 2017.