

Lehrstuhl für Informatik 12
(Hardware-Software-Co-Design)
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Teich

Klausur Hardware-Software-Co-Design

12. April 2022

Deutsche Version

Name	
Matrikelnummer	
Studiengang	
Sitzplatz	

Aufgabe	1	2	3	4	Σ
Max. Punkte	20	26	20	24	90
Erreichte Punkte					
Note					

Organisatorische Hinweise / *Organizational Notes*

Bitte sorgfältig lesen und die Kenntnisnahme durch Unterschrift bestätigen. / *Please read carefully and acknowledge with your signature.*

1. Bitte legen Sie Ihren Studentenausweis bereit. / *Please have your student ID ready.*
 2. Als Hilfsmittel sind nur Schreibmaterialien zugelassen. / *Only writing materials are permitted as aids.*
 3. Schmierpapier wird nicht abgegeben und auch nicht korrigiert. / *Scratch paper will not be handed in and will not be corrected.*
 4. Sie können bei der Aufsicht zusätzliche Bearbeitungsblätter anfordern. / *You can request additional sheets (paper) from the supervisors.*
 5. Bei mehreren präsentierten Lösungen wird die Aufgabe nicht gewertet. Streichen Sie daher bei Angabe mehrerer Lösungsansätze die nicht zu bewertenden Lösungen durch. / *If more than one solution is presented, the task will not be counted. Therefore, if you have several approaches to solving a problem, cross out all solutions not to be evaluated.*
 6. Unleserliches wird nicht bewertet. / *Unreadable answers are not evaluated.*
 7. Die Bearbeitungsdauer beträgt 90 Minuten. / *The examination duration is 90 minutes.*
-

Erklärung / *Declaration*

1. Im Fall einer während der Prüfung auftretenden Prüfungsunfähigkeit zeige ich dies sofort der Aufsicht an und befolge deren Anweisungen. Ich weiß, dass ich die volle Beweislast trage. Ich lasse mir das Formular des Prüfungsamts, das für diese Fälle vorgesehen ist, aushändigen und verfare nach den dort niedergelegten Richtlinien. / *In the event of an inability to take the examination during the examination, I immediately notify the supervisor and follow the supervisor's instructions. I know it is incumbent upon me to produce proof fully. I will have the form of the examination office handed to me, which is intended for such cases, and will proceed according to the guidelines laid down there.*
2. Ich weiß, dass im Fall eines Täuschungsversuchs oder der Benutzung unerlaubter Hilfsmittel („Unterschleif“) der Prüfungsausschuss die Entscheidung treffen kann, die betroffene Prüfungsleistung als mit „nicht ausreichend“ bewertet gelten zu lassen. / *I am aware that in the event of an attempt of deception or the use of unauthorized aids ("cheating"), the Examinations Committee may decide that the examination in question is deemed to have been graded "insufficient".*
3. **Die Hygienemaßnahmen an der FAU, insbesondere die aktuellen Regelungen bei Prüfungen, sind mir bekannt und ich befolge diese genau.** / *I am aware of the hygiene measures at FAU, particularly the current examination's regulations, and I will strictly comply with them.*
4. Ich habe die obigen Hinweise zur Kenntnis genommen. / *I have acknowledged the notes above.*

Erlangen, 12. April 2022

.....
Unterschrift / *Signature*

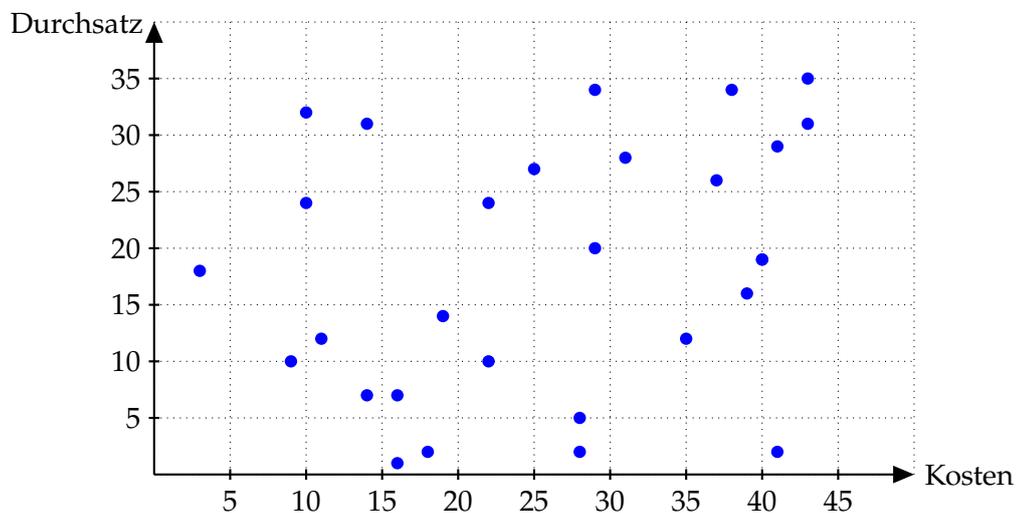
Aufgabe 1 (Kurzfragen)

(20 Punkte)

- a) Erstellen und beschriften Sie das aus der Vorlesung bekannte Doppeldachmodell. Was wird durch die vertikalen und horizontalen Pfeile im Doppeldachmodell dargestellt? (4 Punkte)
- b) Sie entwickeln eine Anwendung für Maschinelles Sehen, bei der verschiedene Bildverarbeitungsalgorithmen eingesetzt werden. Welche der drei in der Vorlesung genannten Graphenmodelle würden dafür in Frage kommen? Begründen Sie Ihre Antwort. (2 Punkte)
- c) Nennen Sie vier verschiedene Zielplattformen für die Implementierung einer solchen Bildverarbeitungsanwendung, und ordnen Sie diese hinsichtlich der Entwurfsziele Performanz und Flexibilität. (4 Punkte)
- d) Nennen Sie vier Stufen einer mehrstufigen Speicherhierarchie auf modernen General-Purpose-Prozessoren (GPPs), und ordnen Sie diese nach Geschwindigkeit und Speichergröße. (4 Punkte)

- e) Gegeben sei das Modell eines Prozessors mit einem einstufigen Cachespeicher (L1-Cache). Die Wahrscheinlichkeit eines L1-Cachehits sei 75%. Die Zugriffszeit auf den L1-Cache und den Hauptspeicher betrage 5 ns bzw. 100 ns. Wie groß ist die mittlere Zugriffszeit t_{avg} für einen Speicherzugriff? (3 Punkte)

- f) Gegeben seien die folgenden Entwurfspunkte in einem explorierten zweidimensionalen Funktionsraum gemäß der Zielgröße Durchsatz und Kosten. Markieren Sie alle Pareto-Punkte, wenn der Durchsatz maximiert und die Kosten minimiert werden sollen. (2 Punkte)



- g) Wie kann man ein Mehrzieloptimierungsproblem auf ein Einzieloptimierungsproblem abbilden? (1 Punkt)

Aufgabe 2 (Compiler und Codegenerierung)

(26 Punkte)

a) Gegeben ist folgendes C-Programm:

```
1  int a = 100;
2  int N = 100000;
3  int k = 1;
4  int x[N];
5  x[0] = 42;
6  do {
7      if (x[k-1] < a) {
8          x[k] = k;
9      } else {
10         x[k] = x[k-1]*2;
11     }
12     k += 1;
9  } while (k < N);
```

- i) Übersetzen Sie den Code-Ausschnitt in 3-Adress-Code (Befehlsformat: $x := y \text{ op } z$) für einen *16-Bit*-Mikroprozessor mit Byte-adressierbarem Speicher. Die Größe eines Integers entspricht der Wortbreite des Prozessors. (9 Punkte)

- ii) Identifizieren Sie alle Grundblöcke, und markieren Sie diese in Ihrem 3-Adress-Code.

(3 Punkte)

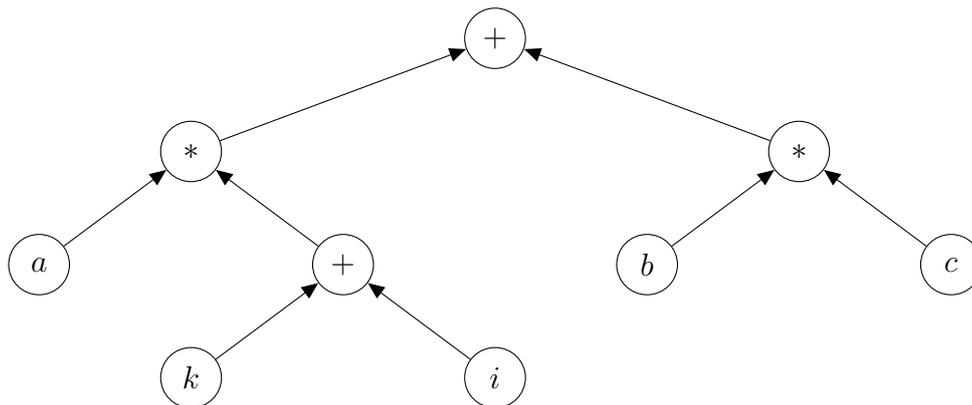
b) Nennen Sie zwei Compiler-Verfahren aus der Vorlesung zur lokalen Codeoptimierung. (1 Punkt)

b) Konstruieren Sie einen DAG (gerichteten azyklischen Graphen) für die folgende Zuweisung (C-Code):

$x[i] = x[i-1] - x[i];$ (5 Punkte)

- c) Betrachten Sie den unten abgebildeten DAG, der ein Stück Zwischencode darstellt. Die Zielmaschine verfügt über zwei Universalregister und folgenden Befehlssatz, wobei die Kosten der Befehle in Klammern angegeben sind. Die Kosten c_{op} für eine Addition seien $c_+ = 1$ und für Multiplikation $c_* = 3$.

$R_i := R_i \text{ op } R_j$	(c_{op})
$R_i := R_i \text{ op } M_j$	$(c_{op} + 2)$
$R_i := R_j$	(1)
$R_i := M$	(2)
$M := R_i$	(2)



- i) Es soll das Verfahren der dynamischen Programmierung zur Code-Erzeugung angewendet werden. Bestimmen Sie die optimalen Kostenvektoren aller Knoten. Tragen Sie diese Kostenvektoren in den oben gegebenen DAG ein. (5 Punkte)
- ii) Generieren Sie kostenoptimalen Zielcode durch Verwendung des oben gegebenen Befehlssatzes. Markieren Sie ihre Auswahl in den Kostenvektoren im DAG. (3 Punkte)

Aufgabe 3 (Hardware/Software-Partitionierung)

(20 Punkte)

Gegeben sei ein Problemgraph mit sechs Tasks t_1, \dots, t_6 (siehe Abbildung 1). Außerdem sei eine Rechenarchitektur gegeben, die über drei Rechenressourcen r_1, r_2, r_3 und eine Kommunikationsressource b_1 verfügt (siehe Abbildung 2). Die Ressourcen in der Architektur können über die eingezeichneten Kanten bidirektional kommunizieren.

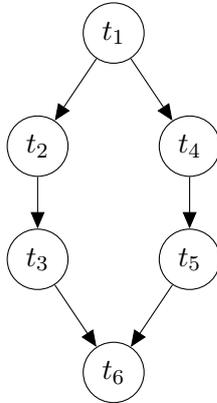


Abbildung 1: Problemgraph, der zu einem Spezifikationsgraphen erweitert werden soll

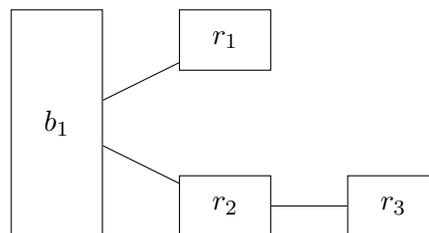


Abbildung 2: Architektur

- a) Erstellen Sie den zu Abbildung 2 zugehörigen Architekturgraphen. Zeichnen Sie diesen in Abbildung 1 rechts ein. (2 Punkte)
- b) Um den Spezifikationsgraphen zu vervollständigen, sind in Abbildung 1 Bindungskanten der Tasks t_1, \dots, t_6 zu Rechenressourcen r_1, r_2, r_3 einzuzichnen. Es gelten folgende Abbildungsmöglichkeiten:
 Der Task t_1 kann nur auf r_1 ausgeführt werden. Die Tasks t_2, t_3 und t_4 können auf jeder der Ressourcen r_1 und r_2 ausgeführt werden. Der Task t_5 kann auf jeder der Ressourcen r_1, r_2 und r_3 ausgeführt werden. Der Task t_6 kann nur auf r_2 ausgeführt werden. (2 Punkte)

- iii) Geben Sie ILP-Nebenbedingungen an, die gewährleisten, dass jede Ressource r_j , $j = 1, 2, 3$ zu allokkieren ist, falls mindestens eine Task an sie gebunden wird. Führen Sie dazu binäre Variablen a_j ein, die angeben, ob die Ressource r_j allokkiert wird. (3 Punkte)
- iv) Geben Sie eine ILP-Nebenbedingung an, die gewährleistet, dass die Summe der Kosten von Tasks t_i , die auf die Ressource r_2 gebunden werden, $c_{\max} = 15$ nicht überschreitet. Die Kosten einer Implementierung von Task t_i auf Ressource r_j seien gegeben als Konstante $c_{i,j}$. (1 Punkt)
- v) Geben Sie Nebenbedingungen an, die sicherstellen, dass unabhängige Tasks wenn möglich parallel abgearbeitet werden. (4 Punkte)

Aufgabe 4 (Schätzung)

(24 Punkte)

- a) Folgende Tabelle zeigt eine Menge D von Entwurfspunkten, die mittels zwei Schätzverfahren hinsichtlich ihrer Entwurfsqualität bewertet wurden ($E_1(D)$ und $E_2(D)$). Die Entwurfsqualität jedes Punktes durch eine Messung $M(D)$ erhoben:

Entwurfspunkt D	$E_1(D)$	$E_2(D)$	$M(D)$
X	40	50	200
Y	15	20	70
Z	50	60	300
W	60	40	400

- i) Bestimmen sie die durchschnittliche Exaktheit beider Schätzverfahren in Prozent (%).
(4 Punkte)
- ii) Bestimmen sie die Treue beider Schätzverfahren in Prozent (%).
(2 Punkte)
- iii) Welches der Schätzverfahren eignet sich besser, um den Entwurfsraum zu reduzieren und warum?
(2 Punkte)

- b) Gegeben ist der Sequenzgraph in Abbildung 3. Die Ausführungszeit einer ALU-Operation, d.h. einer Addition bzw. Subtraktion in Hardware beträgt $del(v_{ALU}) = 26$ ns, die einer Multiplikation in Hardware $del(v_{MUL}) = 60$ ns.

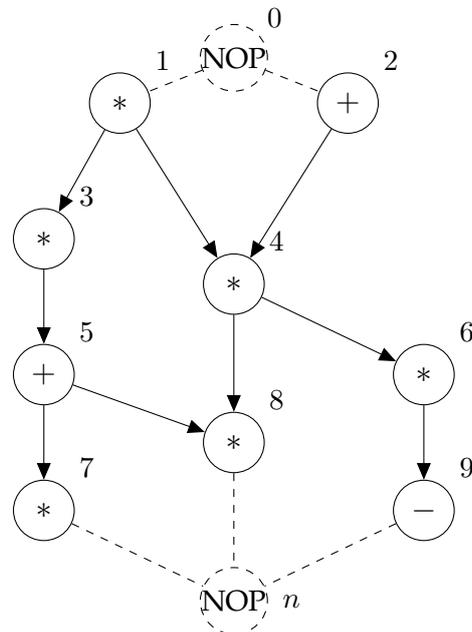
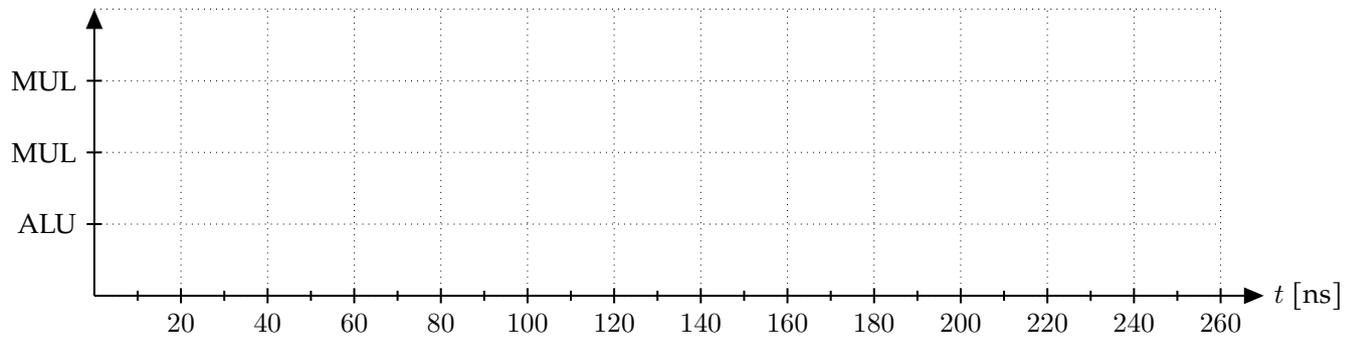


Abbildung 3: Sequenzgraph

- i) Der Sequenzgraph soll nun durch eine Architektur mit zwei Multiplizierern (MUL) und einer ALU implementiert werden. Ermitteln sie die Taktperiode $T_{MaxOpDelay}$ durch Anwendung der Methode der *maximalen Operatorverzögerung*. Geben sie dann die Gesamtausführungszeit $T_{ex,max}$ für diesen Ablaufplan an. Verwenden sie die Anzahl der Nachfolgerknoten als Priorisierungskriterium bei der Ablaufplanung. (2 Punkte)
- ii) Ermitteln sie für dieselbe Allokation von Ressourcen die Taktperiode $T_{MinAvgSlack}$ durch Anwendung des Verfahrens der *Minimierung des mittleren Taktschlupfes*. Bestimmen sie auch hierfür einen gültigen Ablaufplan, und zeichnen sie ihn in das folgende Diagramm ein. Geben sie auch die Gesamtausführungszeit $T_{ex,min}$ für diesen Ablaufplan an. Verwenden sie auch hier die Anzahl der Nachfolgerknoten als Priorisierungskriterium bei der Ablaufplanung. Um wieviele ns verringert sich die Gesamtausführungszeit gegenüber $T_{ex,max}$? (7 Punkte)



- iii) Welches Ablaufplanungsverfahren würden Sie wählen, wenn die Ressourcenallokation vor der Ablaufplanung erfolgt, so dass die Kosten der Implementierung vor und unabhängig von der Ablaufplanung festgelegt sind. HINWEIS: Diese Teilaufgabe kann unabhängig von den anderen Teilaufgaben in 4(b) bearbeitet werden. (2 Punkte)
- c) Der Grundblockgraph in Abbildung 4 soll ein Programm mit Basisblöcken als Knoten darstellen. Dabei sei x_i die Ausführungshäufigkeit jeder Kante d_i , c_i die Ausführungszeit einer Kante d_i , und 10 die Schleifengrenze. Geben Sie für den folgenden Grundblockgraphen in Abbildung 4 die strukturellen Beschränkungen in Form von Flussgleichungen an, die zur Berechnung der WCET unter Verwendung eines ILP verwendet werden.

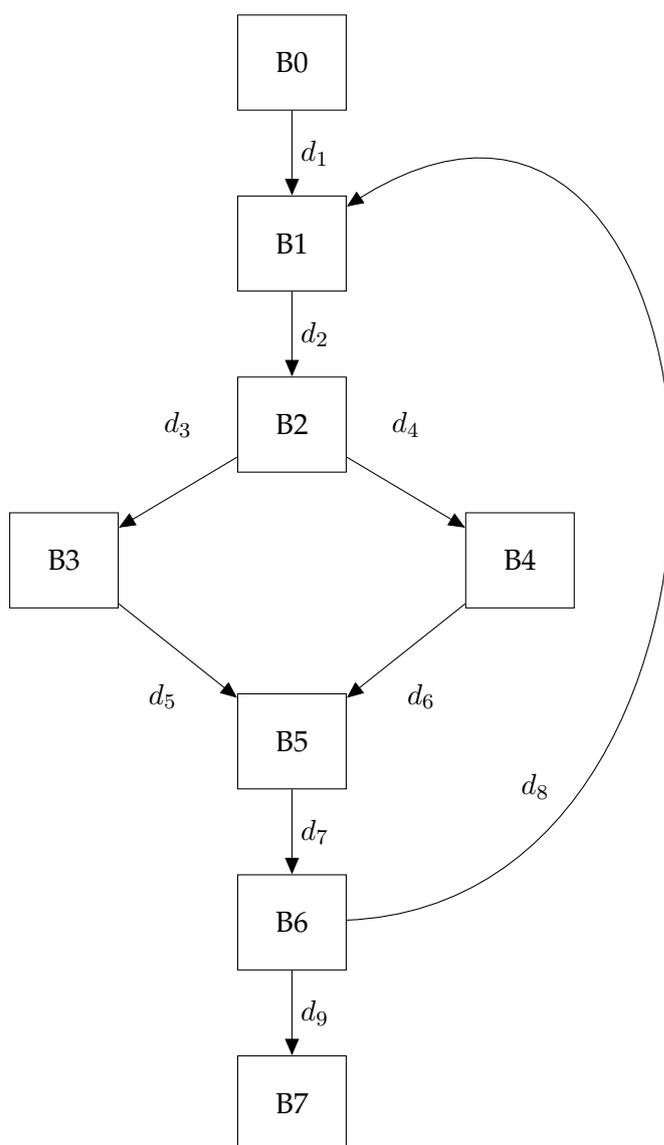


Abbildung 4: Flowgraph

(5 Punkte)

Bearbeitungspapier, Seite 1

Bearbeitungspapier, Seite 2