

UMach Spezifikation

30. August 2012

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	6
1 Einführung	7
2 Organisation der UMac VM	8
2.1 Aufbau	8
2.1.1 Betriebsmodi	8
2.1.2 Neumann Zyklus	10
2.2 Kern	12
2.3 Register	12
2.3.1 Allzweckregister	13
2.3.2 Spezialregister	13
2.3.3 Das ERR Register	15
2.4 Der Speicher	16
2.4.1 Speicherstruktur	16
2.4.2 Speicheradressierung	18
2.5 I/O Einheit	18
2.6 Interrupts	20
2.6.1 Automatische Interrupts	20
2.6.2 Software-Interrupts	21
2.6.3 Interruptnummer	21
3 Instruktionssatz	23
3.1 Allgemeines	23
3.1.1 Instruktionsformate	23
3.1.2 Verteilung des Befehlsraums	27
3.1.3 Notationen	28
3.2 Kontrollinstruktionen	29
3.2.1 NOP	29
3.2.2 EOP	29
3.3 Lade- und Speicherbefehle	30
3.3.1 SET	30
3.3.2 CP	30
3.3.3 LB	31

3.3.4	LW	31
3.3.5	SB	32
3.3.6	SW	33
3.3.7	PUSH	34
3.3.8	POP	34
3.4	Arithmetische Instruktionen	35
3.4.1	ADD	35
3.4.2	ADDU	36
3.4.3	ADDI	36
3.4.4	SUB	37
3.4.5	SUBU	37
3.4.6	SUBI	38
3.4.7	MUL	38
3.4.8	MULU	39
3.4.9	MULI	39
3.4.10	DIV	40
3.4.11	DIVU	40
3.4.12	DIVI	41
3.4.13	ABS	41
3.4.14	NEG	41
3.4.15	INC	42
3.4.16	DEC	42
3.4.17	MOD	42
3.4.18	MODI	43
3.5	Logische Instruktionen	43
3.5.1	AND	43
3.5.2	ANDI	43
3.5.3	OR	44
3.5.4	ORI	44
3.5.5	XOR	44
3.5.6	XORI	45
3.5.7	NOT	45
3.5.8	NOTI	46
3.5.9	NAND	46
3.5.10	NANDI	46
3.5.11	NOR	47
3.5.12	NORI	47
3.5.13	SHL	47
3.5.14	SHLI	48
3.5.15	SHR	48
3.5.16	SHRI	49
3.5.17	SHRA	49
3.5.18	SHRAI	50
3.5.19	ROTL	50

3.5.20	ROTLI	51
3.5.21	ROTR	51
3.5.22	ROTRI	51
3.6	Vergleichsinstruktionen	52
3.6.1	CMP	52
3.6.2	CMPU	52
3.6.3	CMPI	52
3.7	Sprungsbefehle	53
3.7.1	BE	54
3.7.2	BNE	55
3.7.3	BL	55
3.7.4	BLE	55
3.7.5	BG	56
3.7.6	BGE	56
3.7.7	JMP	56
3.8	Unterprogramminstruktionen	57
3.8.1	GO	57
3.8.2	CALL	57
3.8.3	RET	58
3.9	Systeminstruktionen	58
3.9.1	INT	58
3.10	IO Instruktionen	58
3.10.1	IN	58
3.10.2	OUT	59
3.11	Befehlentabelle	60
4	Debugging	62
	Glossar	63
	Index	65

Tabellenverzeichnis

2.1	Spezialregister	14
2.2	ERR Register	15
2.3	Interruptnummer	21
3.1	Verteilung des Befehlsraums	28
3.2	Verwendete Notationen	28
3.3	Befehlentabelle	61

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufbau der UMach Maschine	9
2.2	Von Neumann Zyklus	11
2.3	Speicherstruktur	16
2.4	I/O wird von der I/O Einheit erledigt	19

1 Einführung

UMach ist eine möglichst einfach konzipierte und programmierbare virtuelle Maschine (VM). Um diese Anforderung zu erfüllen wurde auf komplexere Funktionalitäten bewusst verzichtet. Sie besitzt einen fest definierten Instruktionssatz und Architektur. UMach orientiert sich dabei an Prinzipien von RISC Architekturen: feste Instruktionslänge, kleine Anzahl von einfachen Befehlen, Speicherzugriff durch Load- und Store-Befehlen, usw. Die UMach Maschine ist Register-basiert. Der genaue Aufbau dieser Rechenmaschine ist im Abschnitt [2.1](#) ab der Seite [8](#) beschrieben.

Für die Verwendung der virtuellen Maschine wird zuerst eine Assembler-Sprache zur Verfügung gestellt. In dieser Sprache werden Programme geschrieben und anschließend kompiliert. Die kompilierte Datei (Maschinen-Code) kann dann von der virtuellen Maschine ausgeführt werden.

Obwohl in diesem Dokument Namen von Assembler-Befehlen angegeben werden (siehe Kapitel [3](#), [Instruktionssatz](#)) spezifiziert dieses Dokument die UMach Maschine auf Maschinencode Ebene (Register, Bussystem, Instruktionen). Bei der Implementierung eines Assemblers steht es frei, zusätzliche Befehle, Instruktionsformate, Aliase und sprachliche Konstrukte auf der Assembler-Ebene einzuführen. So sind z.B. die folgenden Befehle

```
ADD R1 R2 5
SUB R2 4
```

auf Maschinencode-Ebene ungültig, denn hier verlangt die Formatdefinition der [ADD](#) und [SUB](#) Befehle die Angabe von drei Registern. Ein Assembler kann jedoch diese zusätzliche Formate definieren, solange er daraus gültigen UMach Maschinencode erzeugt. Gültiger Maschinencode für die genannten Beispiele wäre

```
ADDI R1 R2 5 # Maschinencode 0x32 0x01 0x02 0x05
SUBI R2 R2 4 # Maschinencode 0x35 0x02 0x02 0x04
```

2 Organisation der UMach VM

2.1 Aufbau

Die virtuelle UMach Maschine hat einen einfachen Aufbau, der im wesentlichen aus den folgenden Komponenten besteht:

1. Kern (Abschnitt [2.2](#))
2. Speicher (Abschnitt [2.4](#))
3. I/O Einheit (Abschnitt [2.5](#))

Siehe dazu Abbildung [2.1](#) auf Seite [9](#).

Beim Start der Maschine sucht diese nach einem ausführbaren Program im Speicher. Bei Erfolg wird das gefundene Programm instruktionsweise in den Kern geholt und ausgeführt. Nach abarbeiten aller vorhandener Instruktionen verharret die Maschine in einem Wartezustand bis sie ausdrücklich ausgeschaltet wird. Alle Eingabe- und Ausgabeoperationen werden an die I/O-Einheit weitergeleitet und von dieser ausgeführt (siehe auch die Abschnitte [2.5](#) und [3.10](#)).

2.1.1 Betriebsmodi

Die Umach VM kann in zwei verschiedenen Betriebsmodi oder auch Betriebsarten betrieben werden:

1. Normalmodus
2. Debugmodus

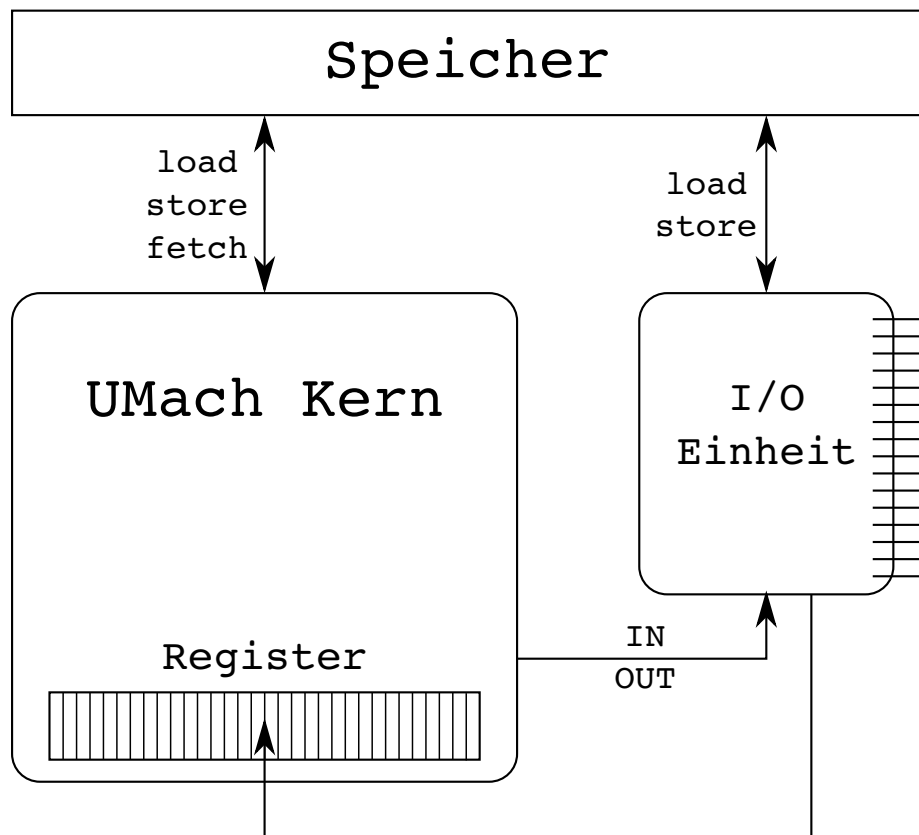


Abbildung 2.1: Aufbau der UMach Maschine

Normalmodus Die virtuelle Maschine führt alle Instruktionen ohne Unterbrechung aus. Nach der Ausführung befindet sich die Maschine in einem Wartezustand, falls sie nicht ausdrücklich ausgeschaltet wird.

Debugmodus Die virtuelle Maschine führt immer nur eine einzige Instruktion aus und bleibt dannach stehen. Um mit der folgenden Instruktion fortzufahren wird immer ein externes Signal benötigt. Dieser Modus soll dem Entwickler erlauben, ein Programm schrittweise zu debuggen. Siehe dazu Kapitel 4, Seite 62.

Der Modus kann vor dem Hochfahren der Maschine festgelegt, jedoch im Betrieb nicht mehr geändert werden. Wird kein Modus angegeben, startet die Maschine im Normalmodus.

2.1.2 Von Neumann Zyklus

Der Von Neumann Zyklus der UMach ist auf 4 Schritte verkürzt. Dies ist möglich, da die Instruktionsbreite immer aus 4 Wörtern besteht, und somit der „FETCH“ von Befehl und zugehörigen Operanden in einem gemeinsamen Schritt durchgeführt werden kann. Somit besteht der Zyklus aus einem beginnenden FETCH. Bei diesem wird der an der im Programmcounter PC liegende Adresse gespeicherte Befehl in das Instruktionsregister IR geladen. Danach wird der im ersten Byte liegende Befehl mit Hilfe des Befehlsdecoders decodiert und an der ALU entsprechend eingestellt.

In einem dritten Schritt EXECUTE wird die Instruktion ausgeführt. Der theoretisch 4. Schritt, das Inkrementieren des Programmcounters PC, wird parallel zu den FETCH und DECODE Vorgängen ausgeführt. Diese Tatsache ist bei Instruktionen, welche den Inhalt des PC manipulieren, zu berücksichtigen. Siehe auch Abbildung 2.2 auf Seite 11.

Auflistung der Schritte:

1. FETCH – Holen der Instruktion aus dem Speicher an der im PC vorliegenden Adresse.
2. DECODE – Decodieren des Befehles und Einstellen der ALU.
3. EXECUTE – Auführen des Befehles in der ALU.
4. UPDATE PC – Inkrementieren des PC. Findet parallel zu FETCH und DECODE statt.

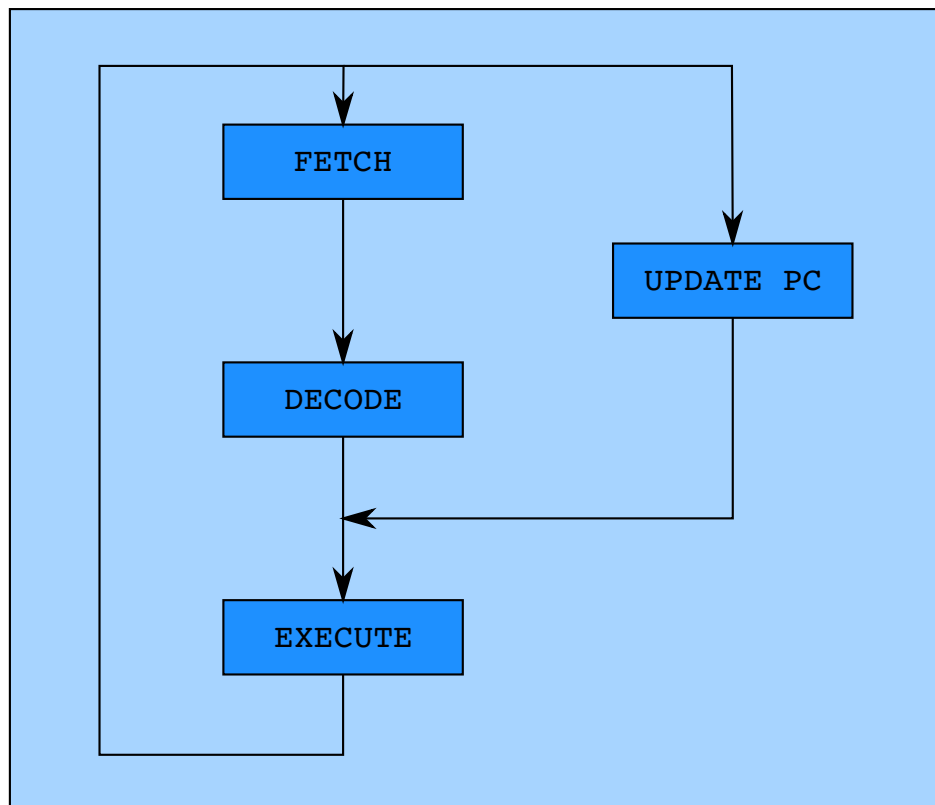


Abbildung 2.2: Von Neumann Zyklus

2.2 Kern

Der Kern der Maschine besteht aus den folgenden Komponenten:

1. Steuerwerk – Das Steuerwerk besteht aus einer Instruction Fetch Unit und einer Decodierungseinheit. Aufgabe der Instruction Fetch Unit ist es, die Programminstruktionen entsprechend dem PC aus dem Speicher zu holen und der Decodierungseinheit zu übergeben. Diese decodiert die Instruktion und stellt die Recheneinheit entsprechend ein.
2. Recheneinheit – Zuständig für die tatsächliche Ausführung der Instruktionen.
3. Register – Kleine Speichereinheiten, die entweder jene Daten halten auf der die Recheneinheit operiert, oder Ergebnisse einer Instruktion aufnehmen.

Der Kern besitzt keine Pipeline.

2.3 Register

Die [Register](#) sind Speichereinheiten im Prozessorkern. Die meisten Instruktionen operieren auf diesen Registern.

Für alle Register gilt:

1. Das Register ist ein Element aus der Menge \mathcal{R} aller Register. Die Notation $x \in \mathcal{R}$ bedeutet somit, dass x ein Register ist.
2. Die Speicherkapazität beträgt 32 Bit.
3. Es gibt eine eindeutige natürliche Nummer, die [Registernummer](#). Diese dient zur Identifikation des Registers in der Maschine und auf Maschinencode-Ebene.
4. Auf Assembler Ebene gibt es einen zusätzlichen eindeutigen Namen für das Register. Dieser Name heißt [Assemblername](#).

Die UMach Maschine besitzt zwei Arten von Registern: die Allzweck- und Spezialregister.

2.3.1 Allzweckregister

Es gibt 32 Allzweckregister, welche dem Programmierer für generelle Zwecke zur Verfügung stehen. Alle Allzweckregister werden beim Hochfahren der Maschine mit dem Wert Null (0x00) initialisiert. Außer dieser Initialisierung verändert die Maschine den Inhalt der Allzweckregister nur in Folge einer expliziten Instruktion.

Die Allzweckregister werden auf Maschinencode-Ebene fortlaufend mit den Registernummern 1 bis 32 gekennzeichnet (0x01 bis einschliesslich 0x20 im Hexadezimalsystem). Die Assemblernamen sind entsprechend $R1, R2 \dots$ bis $R32$. Die Zahl nach dem Buchstaben R ist im Dezimalsystem angegeben und ist fester Bestandteil des Registernamens.

Assemblername	R1	R2	R3	...	R32
Registernummer	0x01	0x01	0x03	...	0x20

Das Register mit der Registernummer Null, oder auch Null-Register, ist ein Spezialregister, welches immer den Wert Null hat und nicht beschreibbar ist. Der Assemblername ist ZERO. (siehe auch Abschnitt 2.3.2 auf Seite 13).

Beispiel für die Verwendung von Registernamen:

Assembler	ADD	R1	R2	R3
Maschinencode	0x50	0x01	0x02	0x03
Bytes	erstes Byte	zweites Byte	drittes Byte	viertes Byte
Algebraisch	$R_1 \leftarrow R_2 + R_3$			

2.3.2 Spezialregister

Die Spezialregister werden von der UMach Maschine für gesonderte Zwecke verwendet, sind aber dem Programmierer sichtbar. Der Inhalt der Spezialregister kann von der Maschine während der Ausführung eines Programms ohne Einfluss seitens Programmierers verändert werden.

Nicht alle Spezialregister können durch Instruktionen überschrieben werden (sind schreibgeschützt).

Die [Registernummern](#) der Spezialregister setzen die Registernummerierung der Allzweckregister zwar bei 33 fort, die Assemblernamen sind aber zweckspezifisch: es gibt kein Spezialregister $R33$. Die [Tabelle 2.1](#) auf Seite 14 enthält die Liste aller Spezialregister. In

der ersten Spalte steht der Assemblername, so wie er vom Programmierer verwendet wird. In der zweiten Spalte ist der Maschinename bzw. die Registernummer im Dezimalsystem angegeben. Die dritte Spalte enthält eine kurze Beschreibung und Bemerkungen. Falls die Beschreibung nicht anders spezifiziert, ist das Register nicht schreibgeschützt.

Tabelle 2.1: Liste der Spezialregister

PC	33	„Instruction Pointer“, oder „Program Counter“. Enthält zu jeder Zeit die Adresse der nächsten Instruktion. Wird auf 256 gesetzt, wenn die Maschine hochfährt. Diese Adresse ist die Startadresse des Programms im Speicher (siehe auch Abschnitt 2.4.1, Seite 16). Wird nach dem Abfangen einer Instruktion in das Register IR automatisch inkrementiert. Schreibgeschützt.
SP	34	„Stack Pointer“. Enthält die Speicheradresse des höchsten Eintrag auf dem Stack. Wird beim Hochfahren der Maschine auf die maximal erreichbare Speicheradresse plus 1 gesetzt. Die 1, die zur maximalen Adresse addiert wird, setzt den stack pointer auf eine ungültige Adresse und sorgt dafür, dass keine Werte mittels POP gelesen werden, bevor Werte auf den Stack gepusht wurden. Siehe auch 2.4.1, Seite 17.
FP	35	„Frame Pointer“. Enthält die Startadresse des Stack Frames einer Subroutine und unterstützt die Implementierung von Funktionen.
IR	36	„Instruction Register“. Enthält die gerade ausgeführte Instruktion. Schreibgeschützt.
STAT	37	Enthält Status-Informationen. Diese Informationen sind in den einzelnen Bits dieses Register gespeichert. Welche Informationen vorhanden sind liegt an der jeweiligen Anwendung.
ERR	38	„Error“. Fehlerregister. Die einzelnen Bits dieses Registers geben Auskunft über Fehler, die mit der Ausführung des Programms verbunden sind. Liegt kein Fehler vor, so ist der Inhalt dieses Registers gleich Null. Ist ein bestimmtes Bit gesetzt, so wird dadurch der entsprechende Fehler signalisiert. Für eine Liste der verwendeten Bits und deren Bedeutung, siehe Tabelle 2.2 auf der Seite 15.
HI	39	„High“. Falls eine Multiplikation durchgeführt wird, enthält dieses Register die höchstwertigen 32 Bits des Ergebnisses der Multiplikation und bildet zusammen mit dem Register LO das volle Ergebnis der Multiplikation. Falls eine Division durchgeführt wird, enthält dieses Register den Quotient der Division.
LO	40	„Low“. Falls eine Multiplikation durchgeführt wird, enthält dieses Register die niedrigstwertigen 32 Bits des Ergebnisses der Multiplikation und bildet zusammen mit dem Register HI das volle Ergebnis der Multiplikation. Falls eine Division durchgeführt wird, enthält dieses Register den Rest der Division.

CMPR	41	„Comparison Result“. Enthält das Ergebnis eines Vergleichs. Siehe auch Abschnitt 3.6, Seite 52.
ZERO	00	Enthält die Zahl Null. Schreibgeschützt.

2.3.3 Das ERR Register

Jedes Bit im Register signalisiert das auftreten eines spezifischen Fehlers. Die Bitstellen werden dabei entsprechend deren Stelligkeiten durchnummeriert: Bit mit Stelligkeit 2^0 hat Position 0, Bit mit Stelligkeit 2^{31} hat die Position 31.

Die Bits im ERR Register werden in die folgenden 4 Gruppen unterteilt:

0 - 7	Kern Fehler
8 - 15	Speicherfehler
16 - 23	I/O Fehler
24 - 31	Systemfehler

Tabelle 2.2 listet alle Fehler auf, die in dem ERR Register signalisiert werden können.

Tabelle 2.2: Bedeutung der einzelnen Bits im ERR Register

0	Division durch Null
1	Arithmetischer Überlauf
5	Ungültiger Befehl
6	Ungültige Registernummer
8	Ungültige Speicheradresse
9	Unerlaubte Speicheradresse
10	Stack Fehler
11	Stack Überlauf
12	Speicher unzureichend
16	I/O Port existiert nicht

Einige der genannten Fehler dürften näher erläutert werden.

Stack Fehler Ein Stack Fehler liegt vor, wenn eine ungültige Stack-Operation durchgeführt werden sollte. Zum Beispiel, wenn ein **POP**-Befehl angegeben wird, ohne vorher entsprechende Daten mittels **PUSH** auf den Stack gepusht zu haben.

Stack Überlauf Ein Stack Überlauf liegt vor, wenn der Stack Pointer (Register **SP**) auf einen Speicherbereich gesetzt wird, der nicht mehr zum Stack-Bereich des Speichers gehört. Das passiert, wenn der Stack Pointer im Program-Bereich oder auf noch kleinere Adressen gesetzt wird.

Die UMach Maschine sollte solche kleine Werte nicht zulassen.

2.4 Der Speicher

Beim Hochfahren der Maschine wird der komplette Speicher mit dem Wert Null initialisiert und anschließend das angegebene Maschinenprogramm in den Speicher geladen. Die Größe des Speichers ist nicht festgelegt.

2.4.1 Speicherstruktur

Der Speicher der UMach Maschine hat zur Laufzeit eine bestimmte Struktur, bzw. wird in bestimmten Bereichen unterteilt. Diese Bereiche sind

1. Interrupttabelle
2. Programm und Daten
3. Stack

Siehe auch die Abbildung 2.3 auf der Seite 16.

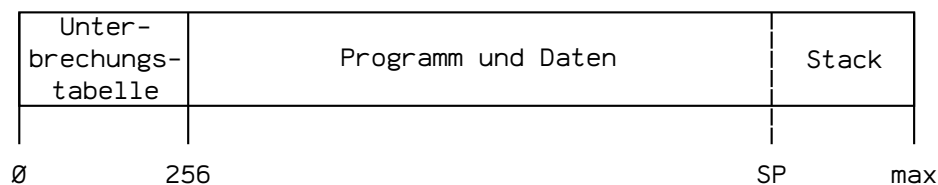


Abbildung 2.3: Speicherstruktur zur Laufzeit

Interrupttabelle

Die Interrupttabelle besteht aus einer Reihe von 32-Bit langen Sprungadressen zum ausführbaren Code, bzw. zu sogenannten Interruptroutinen, oder auch „Interrupt Handlers“, die in Ausnahmefällen ausgeführt werden sollen. Jedes mal, wenn eine Ausnahmesituation auftritt (meistens eine Fehlersituation), wird intern ein Interruptsignal erzeugt, das mit einer Kennnummer (Interruptnummer) versehen ist. Die Interruptnummer wird als Index in dieser Tabelle verwendet.

Die Interrupttabelle wird nicht von der Maschine nicht gefüllt, sondern es ist Aufgabe des Maschinenprogramms bei bedarf entsprechende Einträge der Interrupttabelle zu füllen und die zugehörige Funktionalität bereit zu stellen. Ist eine Interruptadresse nicht gesetzt, d.h. ist der entsprechende Tabelleneintrag Null, so reagiert die Maschine auf die Ausnahmesituation in dem sie hält. Für weitere Informationen bzgl. der Fehlerbehandlung siehe den Abschnitt 2.6, ab der Seite 20.

Die Interrupttabelle besteht aus 64 Einträgen, was 64 möglichen Interrupts entspricht. Jeder Eintrag beträgt wie ein Register 32 Bit, oder 4 Byte. Da es 64 Einträge gibt, ist die Interrupttabelle $64 \cdot 4 = 256$ Bytes groß. Die Interrupttabelle fängt an der Adresse Null an. Siehe auch Abbildung 2.3 auf Seite 16.

Tabelle 2.3 auf Seite 21 listet alle definierten Interruptnummer und deren Bedeutung auf.

Programm und Daten

Nach der 256 Bytes (64 mal 4) großen Interrupttabelle folgt das eigentliche Programm, das von der Maschine ausgeführt werden soll. Dieses erste auszuführende Programm beginnt somit ab der Speicheradresse 256.

Insbesondere ist dieses Programm dafür zuständig, die Interrupttabelle zu füllen, falls (bestimmte) Interrupts behandelt werden sollen.

Der Stack

Der Stack ist ein spezieller Bereich im Speicher. Dieser Bereich fängt am Ende des Speichers mit der größten Adresse an und erstreckt sich bis zur derjenigen Adresse, die im Register SP gespeichert ist. Die Stack-Größe ist damit dynamisch, denn das Register SP wird sowohl durch die Instruktionen **PUSH** und **POP**, als auch direkt vom Programmierer geändert.

Das Wachsen des Stacks bedeutet, dass das Register **SP** immer kleinere Werte annimmt. Das Schrumpfen des Stacks bedeutet, dass **SP** immer größere Werte annimmt. Wird versucht, den Inhalt von **SP** kleiner Null oder größer als die maximale Speicheradresse zu setzen, so wird dies von der Maschine verweigert und als Fehler im Register **ERR** signalisiert.

Beim Hochfahren der Maschine, wird das Register **SP** auf die maximal erreichbare Speicheradresse plus Eins gesetzt. Damit können keine Werte gelesen werden, bevor Werte geschrieben wurden.

2.4.2 Speicheradressierung

Um die Komplexität der UMach Maschine gering zu halten, kennt die vorliegende Version lediglich absolute Adressen. Konzepte wie virtuelle Adressen, Prozesse und getrennte Adressräume für Prozesse werden nicht unterstützt. Wird versucht, den Inhalt einer Speicheradresse zu lesen oder zu schreiben, so wird die angegebene Adresse nicht übersetzt oder modifiziert, sondern direkt verwendet.

2.5 I/O Einheit

Die I/O-Architektur der UMach Maschine ist am sogenannten „Port-Mapped I/O“, oder „Port I/O“ angelehnt¹. Obwohl diese Architektur deutliche Einschränkungen hat, wird sie wegen ihrer konzeptionellen Einfachheit benutzt.

Alle I/O Operationen finden zwischen dem Speicher und den Peripherie-Geräten statt. Dabei wird der gesamte Datentransfer von der I/O-Einheit vermittelt und gesteuert (siehe Abbildung 2.4 auf Seite 19). Die I/O-Einheit besitzt zu diesem Zweck einen direkten Zugriff auf den Speicher und kann dort unabhängig vom Kern lesen und schreiben (Direct Memory Access, **DMA**). Es ist zu bemerken, dass der direkte Speicherzugriff von der I/O-Einheit unternommen wird und nicht von den peripherischen Geräten selbst.

Alle I/O Operationen werden vom Kern unter Programmkontrolle angestoßen (siehe auch Abschnitt 3.10 auf Seite 58). Es werden also keine I/O Operationen ausgeführt, die nicht explizit durch Maschinenbefehle angefordert werden. Insbesondere werden keine I/O-Operationen aufgrund von Unterbrechungsanforderungen (interrupts) initialisiert.

Wenn ein I/O-Befehl ausgeführt wird, delegiert der Kern die Ausführung an die I/O-Einheit und wartet, bis diese fertig ist. Erst wenn die I/O-Einheit mit dem Transfer

¹Als Gegenstück von „Memory Mapped I/O“.

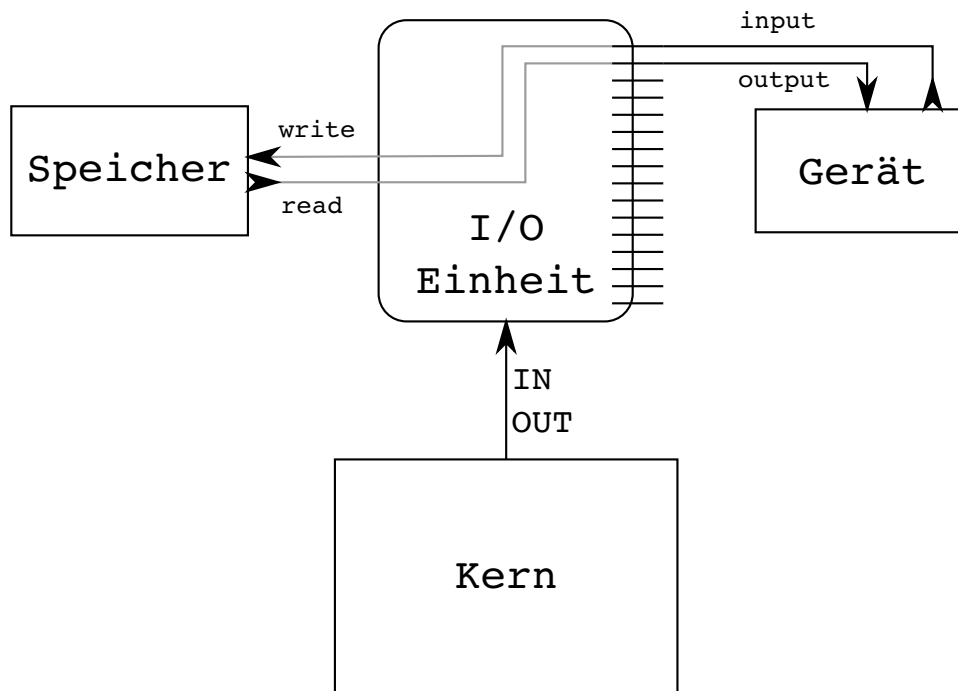


Abbildung 2.4: I/O wird von der I/O Einheit erledigt

zwischen Speicher und Peripherie fertig ist, fährt der Kern mit dem Programmablauf fort. Es werden parallel keine Instruktionen aus dem Speicher geholt oder ausgeführt.

Die I/O-Einheit der UMac Maschine besteht aus einer Reihe von jeweils 8 Eingangs- und Ausgangsschnittstellen, auch Ports genannt. An diesen Ports können verschiedene physikalische Geräte angeschlossen werden, welche die entsprechenden Daten generieren bzw. verarbeiten können. (Siehe Abbildung 2.1 auf Seite 9.)

Die I/O Ports sind in zwei Kategorien unterteilt: 8 Eingabeports und 8 Ausgabeports. Von der Bauart und Struktur her, gibt es innerhalb der jeweiligen Kategorie keine Unterschiede zwischen Ports. Sie werden lediglich anhand deren Nummern identifiziert. Die Nummerierung der Ports fängt bei 0 an und wird bis einschließlich Port 7 fortgeführt.

Die Eingabe- und Ausgabefunktionen der I/O-Einheit werden durch I/O-Instruktionen angefordert. Diese Instruktionen werden im Abschnitt 3.10, ab der Seite 58 beschrieben.

Bemerkung Zu diesem Entwicklungspunkt sind für die peripherischen Geräte, bzw. für die entsprechenden Ports keine Kontrolle- oder Statusregister vorgesehen. Es gibt auch keine entsprechende Befehle für die Kontrolle und Statusabfrage der peripherischen Geräte. Es wird lediglich in den Speicher eingelesen und aus dem Speicher ausgegeben. Eine zukünftige Version dieser Maschine könnte die Kontrolle der peripherischen Geräte

hinzufügen (wie z.B. ein- und ausschalten der Geräte).

2.6 Interrupts

Ein Interrupt ist eine Unterbrechung der Programmausführung unter bestimmten Umständen. Die UMach Maschine verwendet die folgenden Arten von Interrupts:

1. Automatische Interrupts, oder Hardware-Interrupts, die aufgrund von Fehlern geschehen und eine rudimentäre Fehlerbehandlung bei schwerwiegenden Fehlern, wie die Nulldivision, ermöglichen sollen.
2. Software-Interrupts, die vom der Software angefordert werden können.

Jeder Interrupt hat eine bestimmte Nummer, die ganzzahlige Werte von 0 bis 63 annimmt. Die Interruptnummer wird als Index in der Interrupttabelle verwendet, um die Speicheradresse einer Interruptroutine zu finden (siehe den Abschnitt 2.4.1, besonders die Tabelle 2.3 auf der Seite 21). Ist diese Adresse ungleich Null, so wird das PC Register auf diese Adresse gesetzt und die Interruptroutine wird ausgeführt. Wird keine solche Routine gefunden, so wird die gesamte Programmausführung unterbrochen und die Maschine hält an.

Die Interruptroutinen müssen vom Hauptprogramm als Sprungadressen in der Interrupttabelle gesetzt werden. Jede solche Interruptroutine sollte folgendes beachten:

- Bevor die Routine aufgerufen wird, sichert die Maschine auf den Stack nur das Register PC. Andere Register wie SP müssen von der Routine selbst gesichert und wiederhergestellt werden.

2.6.1 Automatische Interrupts

Im Normalfall wird eine Instruktion ohne Weiteres ausgeführt. In Ausnahmefällen – wenn die Instruktion nicht ausgeführt werden kann, meistens wegen ungültigen Parametern – wird eine Ausnahmesituation durch eine Interruptnummer signalisiert und der Programmfluss unterbrochen.

Beispiel Zum Beispiel, die **DIV** Instruktion (Division) erzeugt den Interrupt mit Nummer 1, falls ihr zweites Argument gleich Null ist (siehe auch die Tabelle 2.3 auf der Seite 21). Wenn der Interrupt bearbeitet wird, schaut die Maschine in der Interrupttabelle an

der Position 1 nach. Ist der Eintrag ungleich Null, so wird der Eintrag als Adresse einer Routine behandelt und dorthin gesprungen: das Register PC wird zuerst auf den Stack gesichert und dannach gleich dem Tabelleneintrag gesetzt. Ist der Eintrag dagegen Null, so hält die Maschine an.

2.6.2 Software-Interrupts

Eine Unterbrechung der Programmausführung kann auch absichtlich erzeugt werden. Dafür verwendet man den Befehl `INT`. Wenn ein Software-Interrupt generiert wird, verhält sich die Maschine wie im Falle eines automatischen Interrupts.

2.6.3 Interruptnummer

Tabelle 2.3: Interruptnummer

Nummer	Beschreibung
0	Standardinterrupt: Maschine ausschalten
1	Division durch Null
2	Arithmetischer Überlauf
8	Ungültiger Befehl
9	Ungültige Registernummer
16	Ungültige Speicheradresse
17	Unerlaubte Speicheradresse
24	Stack Fehler
26	Stack Überlauf
31	Speicher unzureichend
32	I/O Port existiert nicht
56	Interner Fehler
63	Syscall, Aufruf an das Betriebssystem

Einige Interruptnummer dürften eine Erklärung brauchen:

Stack Fehler Ein Stack Fehler liegt vor, wenn Daten aus dem Stack angefordert werden, die nicht zuvor auf den Stack gepusht wurden.

Stack Überlauf Ein Stack Überlauf liegt vor, wenn der Stack-Pointer **SP** in einem Speicherbereich zeigt, der nicht mehr zum Stackbereich gehört. Das sind Adressen, die dem Programm-Bereich gehören, oder sogar niedrigere Adressen.

3 Instruktionssatz

In diesem Kapitel werden alle Instruktionen der UMach VM vorgestellt.

3.1 Allgemeines

3.1.1 Instruktionsformate

Eine Instruktion besteht aus einer Folge von 4 Bytes. Das [Instruktionsformat](#) beschreibt die Struktur einer Instruktion auf Byte-Ebene. Das Format gibt an, ob ein Byte als eine Registerangabe oder als reine numerische Angabe zu interpretieren ist.

Instruktionsbreite Jede UMach-Instruktion hat eine feste Bitlänge von 32 Bit (4 mal 8 Bit). Instruktionen, die für ihren Informationsgehalt weniger als 32 Bit brauchen, wie z.B. NOP, werden mit Nullbits gefüllt. Alle Daten und Informationen, die mit einer Instruktion übergeben werden, müssen in diesen 32 Bit untergebracht werden.

Byte Order Die Byte Order (Endianness) der gelesenen [Bytes](#) ist big-endian. Die zuerst gelesenen 8 Bits sind die 8 höchstwertigen (Wertigkeiten 2^{31} bis 2^{24}) und die zuletzt gelesenen Bits sind die niedrigstwertigen (Wertigkeiten 2^7 bis 2^0). Bits werden in Stücken von n Bits gelesen, wobei $n = k \cdot 8$ mit $k \in \{1, 4\}$ (byteweise oder wortweise).

Allgemeines Format Jede [Instruktion](#) besteht aus zwei Teilen: der erste Teil ist 8 Bit lang und entspricht dem tatsächlichen [Befehl](#), bzw. der Operation, die von der UMach virtuellen Maschine ausgeführt werden soll. Dieser 8-Bit-Befehl belegt also die 8 höchstwertigen Bits einer 32-Bit-Instruktion. Die übrigen 24 Bits, wenn sie verwendet werden, werden für Operanden oder Daten benutzt. Beispiel einer Instruktionszerlegung:

Instruktion (32 Bit)	00000001	00000010	00000011	00000100
Hexa	01	02	03	04
Byte Order	erstes Byte	zweites Byte	drittes Byte	viertes Byte
Interpretation	Befehl (8 Bit)	Operanden, Daten oder Füllbits		

Die Instruktionsformate unterscheiden sich lediglich darin, wie sie die 24 Bits nach dem 8-Bit **Befehl** verwenden. Das wird auch in der 3-buchstabigen Benennung deren Formate wiedergegeben.

In den folgenden Abschnitten werden die UMach-Instruktionsformate vorgestellt. Jede Angegebene Tabelle gibt in der ersten Zeile die Reihenfolge der Bytes an. Die nächste Zeile gibt die spezielle Belegung der einzelnen Bytes an.

000

erstes Byte	zweites Byte	drittes Byte	viertes Byte
Befehl	nicht verwendet		

Eine Instruktion, die das Format 000 hat, besteht lediglich aus einem Befehl ohne Argumenten. Die letzten drei Bytes werden von der Maschine nicht ausgewertet und sind somit Füllbytes. Es wird empfohlen, die letzten 3 Bytes mit Nullen zu füllen.

NNN

erstes Byte	zweites Byte	drittes Byte	viertes Byte
Befehl	numerische Angabe N		

Die Instruktion im Format NNN besteht aus einem Befehl im ersten Byte und aus einer numerischen Angabe N (einer Zahl), die die letzten 3 Bytes belegt. Die Interpretation der numerischen Angabe wird dem jeweiligen Befehl überlassen.

R00

erstes Byte	zweites Byte	drittes Byte	viertes Byte
Befehl	R_1	nicht verwendet	

Die Instruktion im Format R00 besteht aus einem Befehl im ersten Byte gefolgt von der Angabe eines Registers im zweiten Byte. Die letzten zwei Bytes werden nicht verwendet, bzw. werden ignoriert.

RNN

erstes Byte	zweites Byte	drittes Byte	viertes Byte
Befehl	R_1	numerische Angabe N	

Eine Instruktion im Format RNN besteht aus einem Befehl, gefolgt von einer Register Nummer R_1 , gefolgt von einer festen Zahl N , die die letzten 2 Bytes der Instruktion belegt. Die genaue Interpretation der Zahl N wird dem jeweiligen Befehl überlassen. Zum Beispiel, die Instruktion

erstes Byte	zweites Byte	drittes Byte	viertes Byte
0x20	0x01	0x02	0x03

wird folgenderweise von der UMach Maschine interpretiert: die Operation mit Nummer 0x20 soll ausgeführt werden, wobei die Argumenten dieser Operation sind das Register mit Nummer 0x01 und die numerische Angabe 0x0203.

RR0

erstes Byte	zweites Byte	drittes Byte	viertes Byte
Befehl	R_1	R_2	nicht verwendet

Eine Instruktion im Format RR0 besteht aus einem Befehl im ersten Byte, gefolgt von der Angabe zweier Register in den folgenden 2 Bytes. Das dritte Byte wird nicht verwendet, bzw. wird ignoriert.

RRN

erstes Byte	zweites Byte	drittes Byte	viertes Byte
Befehl	R_1	R_2	numerische Angabe N

Eine Instruktion im Format RRN besteht aus einem Befehl, gefolgt von der Angabe zweier Registers R_1 und R_2 , jeweils in einem Byte, gefolgt von einer numerischen Angabe N (festen Zahl) im letzten Byte. Zum Beispiel, die Instruktion

erstes Byte	zweites Byte	drittes Byte	viertes Byte
0x52	0x01	0x02	0x03

soll wie folgt interpretiert werden: die Operation mit Nummer 0x52 soll ausgeführt werden, wobei die Argumenten dieser Operation sind Register mit Nummer 0x01, Register mit Nummer 0x02 und die Zahl 0x03.

RRR

erstes Byte	zweites Byte	drittes Byte	viertes Byte
Befehl	R_1	R_2	R_3

Eine Instruktion im Format RRR besteht aus der Angabe eines Befehls im ersten Byte, gefolgt von der Angabe dreier Register R_1 , R_2 und R_3 in den jeweiligen folgenden drei Bytes. Die Register werden als Zahlen angegeben und deren Bedeutung hängt vom jeweiligen Befehl ab.

Zusammenfassung

Im folgenden werden die Instruktionsformate tabellarisch zusammengefasst.

Format	erstes Byte	zweites Byte	drittes Byte	viertes Byte
000	Befehl	nicht verwendet		
NNN	Befehl	numerische Angabe N		
R00	Befehl	R_1	nicht verwendet	
RNN	Befehl	R_1	numerische Angabe N	
RR0	Befehl	R_1	R_2	nicht verwendet
RRN	Befehl	R_1	R_2	numerische Angabe N
RRR	Befehl	R_1	R_2	R_3

3.1.2 Verteilung des Befehlsraums

Zur besseren Übersicht der verschiedenen UMach-[Instruktionen](#), unterteilen wir den [Instruktionssatz](#) der UMach virtuellen Maschine in den folgenden Kategorien:

1. Kontrollinstruktionen, die die Maschine in ihrer gesamten Funktionalität betreffen, wie z.B. den Betriebsmodus umschalten.
2. Lade- und Speicherbefehle, die Register mit Werten aus dem Speicher, anderen Registern oder direkten numerischen Angaben laden und die Registerinhalte in den Speicher schreiben.
3. Arithmetische Instruktionen, die einfache arithmetische Operationen zwischen Registern veranlassen.
4. Logische Instruktionen, die logische Verknüpfungen zwischen Registerinhalten oder Operationen auf Bit-Ebene in Registern anweisen.
5. Vergleichsinstruktionen, die einen Vergleich zwischen Registerinhalten angeben.
6. Sprunginstruktionen, die bedingt oder unbedingt sein können. Sie weisen die UMach Maschine an, die Programmausführung an einer anderen Stelle fortzufahren.
7. Unterprogramm-Steuerung, bzw. Instruktionen, die die Ausführung von Unterprogrammen (Subroutinen) steuern.
8. Systeminstruktionen, die die Unterstützung eines Betriebssystems ermöglichen.
9. IO Instruktionen

Die oben angegebenen Instruktionskategorien unterteilen den [Befehlsraum](#) in 9 Bereiche. Es gibt 256 mögliche Befehle, gemäß $2^8 = 256$. Die Verteilung der Kategorien auf die verschiedenen Maschinencode-Intervallen wird in der Tabelle [3.1](#) auf Seite [28](#) angegeben.

Die Tabelle [3.3](#) auf der Seite [61](#) enthält eine Übersicht aller Befehle und deren Maschinencodes. Diese Tabelle wird folgenderweise gelesen: in der am weitesten linken Spalte wird die erste hexadezimale Ziffer eines Befehls angegeben (ein Befehl ist zweistellig im Hexadezimalsystem). Jede solche Ziffer hat rechts zwei Zeilen, die von links nach rechts gelesen werden: eine Zeile für die Ziffern von 0 bis 8, die anderen für die übrigen Ziffern 9 bis F (im Hexadezimalsystem). Die Assemblernamen (Mnemonics) der einzelnen Befehle sind an der entsprechenden Stelle angegeben.

Maschinencodes	Kategorie
00 - 0F	Kontrollbefehle
10 - 2F	Lade-/Speicherbefehle
30 - 4F	Arithmetische Befehle
50 - 6F	Logische Befehle
70 - 7F	Vergleichsbefehle
80 - 8F	Sprungbefehle
90 - 9F	Unterprogrammbefehle
A0 - AF	Systembefehle
B0 - BF	IO Befehle

Tabelle 3.1: Verteilung des Befehlsraums nach Befehlskategorien. Die Zahlen sind im Hexadezimalsystem angegeben.

Definitionsstruktur Im den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Instruktionen beschrieben. Zu jeder Instruktion wird der [Assemblername](#), die Parameter, der Maschinencode und das Instruktionsformat, das die Typen der Parameter definiert, formal angegeben. Zudem werden Anwendungsbeispiele angegeben. Die Instruktionsformate können im Abschnitt [3.1.1](#) ab der Seite [23](#) nachgeschlagen werden.

3.1.3 Notationen

Mit \mathcal{R} wird die Menge aller Register gekennzeichnet¹. Die Notation $X \in \mathcal{R}$ bedeutet, dass X ein Element aus dieser Menge ist, mit anderen Worten, dass X ein Register ist. Analog bedeutet die Schreibweise $X, Y \in \mathcal{R}$, dass X und Y beide Register sind.

Wenn X ein Register bezeichnet, dann bezeichnet $\$X$ den Inhalt des Registers X . Diese Notation wird verwendet, um in Aussagen wie „ $\$X + \Y “ klar zu machen, dass es sich um die Registerinhalte von X und Y handelt, nicht um die Register selbst.

Die Tabelle [3.2](#) auf der Seite [28](#) wiedergibt alle Notationen, die in diesem Kapitel verwendet werden.

Tabelle 3.2: Verwendete Notationen

Notation	Bedeutung
\mathbb{N}	Menge aller natürlichen Zahlen: $0, 1, 2, \dots$
$\mathbb{N}_{\setminus 0}$	\mathbb{N} ohne die Null: $1, 2, \dots$
\mathbb{Z}	Menge aller ganzen Zahlen: $\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$

¹Nicht verwechseln mit den Symbolen \mathbb{R} und \mathbb{R} , die die Menge aller reellen Zahlen bedeuten.

Notation	Bedeutung
$\mathbb{Z}_{\setminus 0}$	\mathbb{Z} ohne die Null: $\dots, -2, -1, 1, 2, \dots$
$N \in \mathbb{N}$	N ist Element von \mathbb{N} , oder liegt im Bereich von \mathbb{N}
\mathcal{R}	Menge aller Register
$X \in \mathcal{R}$	X ist ein Register
$\$X$	Inhalt des Registers X
$a \leftarrow b$	a wird auf b gesetzt
$X \leftarrow \$Y$	X wird auf den Inhalt des Registers Y gesetzt
$mem(X)$	Speicherinhalt an der Adresse X (1 Byte)
$mem_n(X)$	n -Bytes-Block im Speicher ab Adresse X
$mem[n]$	äquivalent zu $mem(n)$
$lsb_n(X)$	„least significant n bits“ von X

3.2 Kontrollinstruktionen

3.2.1 NOP

Assemblernamen	Parameter	Maschinencode	Format
NOP	keine	0x00	000

Diese Instruktion („No Operation“) bewirkt nichts. Der Sinn dieser Instruktion ist, den Maschinencode mit Nullen füllen zu können, ohne dabei die gesamte Ausführung zu beeinflussen, außer, Zeitlupen zu schaffen.

3.2.2 EOP

Assemblernamen	Parameter	Maschinencode	Format
EOP	keine	0x04	000

„End Of Program“. Die Maschine ausschalten.

3.3 Lade- und Speicherbefehle

3.3.1 SET

Assemblernamen	Parameter	Maschinencode	Format
SET	$X \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{Z}$	0x10	RNN

Setzt den Inhalt des Registers X auf den ganzzahligen Wert N . Da N mit 16 Bit und im Zweierkomplement dargestellt wird, kann N Werte von -2^{15} bis $2^{15} - 1$ aufnehmen, bzw. von -32768 bis $+32767$. Werte außerhalb dieses Intervalls werden auf Assembler-Ebene entsprechend gekürzt (es wird modulo berechnet, bzw. nur die ersten 16 Bits aufgenommen).

Beispiele:

```
label:
    SET R1 8      # R1 ← 8
    SET R2 -3     # R2 ← -3
    SET R3 65536  # R3 ← 0, da 65536 = 216 ≡ 0 mod 216
    SET R4 70000  # R3 ← 4464 = 70000 mod 216
    SET R7 label # Adresse 'label' ins R7
```

3.3.2 CP

Assemblernamen	Parameter	Maschinencode	Format
CP	$X, Y \in \mathcal{R}$	0x11	RR0

„Copy“. Kopiert den Inhalt des Registers Y in das Register X . Register Y wird dabei nicht geändert. Entspricht

$$X \leftarrow \$Y$$

Beispiel:

```
SET R1 5  # R1 ← 5
CP  R2 R1 # R2 ← 5
```

3.3.3 LB

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
LB	$X, Y \in \mathcal{R}$	0x12	RR0

Lade ein Byte aus dem Speicher mit Adresse $\$Y$ in das niedrigstwertige Byte des Registers X . Die anderen Bytes von X werden von diesem Befehl nicht geändert. Insbesondere, werden sie nicht auf Null gesetzt.

Äquivalenter C Code:

```
| x = (x & 0xFFFFFFFF00) | (mem(y) & 0x00FF);
```

Entspricht

$$lsb_8(X) \leftarrow mem(\$Y)$$

(siehe Tabelle 3.2 auf Seite 28 für die Notationen).

Fehler Falls der Inhalt des Registers Y eine ungültige Speicheradresse ist, wird der Interrupt mit Nummer 16 (ungültige Speicheradresse) generiert und das Bit mit Nummer 8 im Register `ERR` gesetzt.

Beispiel Angenommen, der Speicher an den Adressen 100 und 101 hat den Wert 5, bzw. 6. Dann können diese zwei nacheinander folgenden Bytes auf die folgende Weise in $R2$ gelesen werden. $R1$ wird dabei als Zeiger im Speicher verwendet.

```
| SET  R1      100    # Speicheradresse R1 = 100
| SET  R2      0
| LB   R2  R1        # R2 = 5 (mem(100))
| SHLI R2  R2    8    # shift left 8 Bit, R2 = 1280
| INC  R1
| LB   R2  R1        # R2 = 1286 (R2 + mem(101))
```

3.3.4 LW

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
LW	$X, Y \in \mathcal{R}$	0x13	RR0

„Load Word“. Lade ein Wort (4 Byte) aus dem Speicher mit Adresse $\$Y$ in das Register X . Alle Bytes von X werden dabei überschrieben. Die Bytes aus dem Speicher werden nacheinander gelesen. Es werden also die Bytes mit Adressen $\$Y + 0$, $\$Y + 1$, $\$Y + 2$ und $\$Y + 3$ zu einem 4-Byte Wort zusammengesetzt und so in X ablegt.

Entspricht

$$X \leftarrow mem_4(\$Y)$$

Fehler Wie bei der Instruktion [LB](#).

Bemerkung die UMach Maschine verwendet stets die „big-endian“ Byte-Reihenfolge.

Beispiel Angenommen, die Adressen von 100 bis 103 sind mit den Werten 0, 1, 2 und 3 belegt und bilden somit den Wert 66051.

SET	R1	100	
LW	R2	R1	# $R2 \leftarrow mem_4(R1) = 66051$

3.3.5 SB

Assemblernamen	Parameter	Maschinencode	Format
SB	$X, Y \in \mathcal{R}$	0x14	RR0

„Store Byte“. Speichert den Inhalt des niedrigstwertigen Byte von X an der Speicheradresse $\$Y$. X und Y sind dabei Register.

Entspricht

$$\$X \rightarrow mem_1(\$Y)$$

$mem_1(x)$ bedeutet dabei 1 Byte an der Adresse x .

Fehler Falls der Inhalt des Registers Y eine ungültige Speicheradresse ist, wird der Interrupt mit Nummer 16 (ungültige Speicheradresse) generiert und das Bit mit Nummer 8 im Register **ERR** gesetzt.


```

SET R1 128      # R1 = Speicheradresse 128
SET R2 513      # R2 = 0x0201
SB  R2 R1       # Speicher mit Adresse 128 wird auf 1 gesetzt

```

3.3.6 SW

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
SW	$X, Y \in \mathcal{R}$	0x15	RR0

„Store Word“. Speichert den Inhalt aller Bytes in X an die Speicheradressen $\$Y$ bis $\$Y + 3$.

$$\$X \rightarrow mem_4(\$Y)$$

Fehler Falls der Inhalt des Registers Y eine ungültige Speicheradresse ist, wird der Interrupt mit Nummer 16 (ungültige Speicheradresse) generiert und das Bit mit Nummer 8 im Register ERR gesetzt.

Beispiel Es wird das Register $R2$ mit dem Wert 0x01020304 geladen und an die Adresse 128 gespeichert. Dabei werden die Byte-Werten in „big-endian“ Reihenfolge gespeichert: das höchstwertige Byte aus $R2$ (0x01) wird an der Adresse 128 gespeichert, das niedrigstwertige Byte (0x04) an die Adresse 131.

```

SET R1 128      # R1 = Speicheradresse 128
SET R2 0x01020304 # Wert zum Speichern
SH  R2 R1       # mem[128] = 0x01
                  # mem[129] = 0x02
                  # mem[130] = 0x03
                  # mem[131] = 0x04

```

3.3.7 PUSH

Assemblernamen	Parameter	Maschinencode	Format
PUSH	$X \in \mathcal{R}$	0x18	R00

„Push Word“. Erniedrigt das Register SP um 4 und kopiert das ganze Register X auf den Stack, wobei der „Stack“ ist der Speicherbereich mit Anfangsadresse in SP . Die Byte-Reihenfolge der Lese- und Schreiboperationen ist „Big-Endian“ und wird in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

X Wertigkeiten	$2^{31} \leftrightarrow 2^{24}$	$2^{23} \leftrightarrow 2^{16}$	$2^{15} \leftrightarrow 2^8$	$2^7 \leftrightarrow 2^0$
	↓	↓	↓	↓
Stack-Bereich	$\text{mem}[SP + 0]$	$\text{mem}[SP + 1]$	$\text{mem}[SP + 2]$	$\text{mem}[SP + 3]$

Entspricht

$$SP \leftarrow \$SP - 4$$

$$\$X \rightarrow \text{mem}_4(SP)$$

Fehler Falls die Verringerung $\$SP - 4$ eine Speicheradresse außerhalb des Stackbereichs ergibt, wird der Interrupt mit Nummer 26 (Stack Überlauf) generiert und das Bit mit Nummer 11 im Register **ERR** gesetzt.

Beispiel Der folgende Code speichert das 4-Byte Wort 0x01020304 auf den Stack. Die Stack-Struktur wird in Kommentaren gezeigt.

```
SET  R1 0x01020304 # Wert zum pushen
PUSH R1             # mem[SP + 0] = 0x01
                   # mem[SP + 1] = 0x02
                   # mem[SP + 2] = 0x03
                   # mem[SP + 3] = 0x04
```

3.3.8 POP

Assemblernamen	Parameter	Maschinencode	Format
POP	$X \in \mathcal{R}$	0x19	R00

„Pop Word“. Speichert 4 Bytes ab der Adresse $\$SP$ in das Register X und erhöht $\$SP$ um 4. Die Byte-Reihenfolge der Lese- und Schreiboperationen ist „Big-Endian“ und wird in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

X Wertigkeiten	$2^{31} \leftrightarrow 2^{24}$	$2^{23} \leftrightarrow 2^{16}$	$2^{15} \leftrightarrow 2^8$	$2^7 \leftrightarrow 2^0$
	↑	↑	↑	↑
Stack-Bereich	$\text{mem}[\$SP + 0]$	$\text{mem}[\$SP + 1]$	$\text{mem}[\$SP + 2]$	$\text{mem}[\$SP + 3]$

Entspricht

$$\begin{aligned} X &\leftarrow \text{mem}_4(\$SP) \\ SP &\leftarrow \$SP + 4 \end{aligned}$$

Fehler Falls das Register SP zu einer Adresse außerhalb des Stackbereichs zeigt, wird der Interrupt mit Nummer 24 (Stack Fehler) generiert und das Bit mit Nummer 10 im Register ERR gesetzt.

Beispiel Angenommen, die ersten 4 Bytes auf dem Stack (d.h. ab der Adresse, die im Register SP angegeben ist) sind 0xAA 0xBB 0xCC 0xDD.

```
| POPH R1          # R1 = 0xAABBCCDD
```

3.4 Arithmetische Instruktionen

3.4.1 ADD

Assemblernamen	Parameter	Maschinencode	Format
ADD	$X, Y, Z \in \mathcal{R}$	0x30	RRR

Vorzeichen behaftete Addition der Registerinhalte $\$Y$ und $\$Z$. Das Ergebnis der Addition wird in das Register X gespeichert. Entspricht dem algebraischen Ausdruck

$$X \leftarrow \$Y + \$Z$$

Fehler Falls das Ergebnis der Addition sich nicht mit 32 Bit darstellen lässt wird der Interrupt mit Nummer 2 generiert (arithmetischer Überlauf) und das Bit mit Nummer 1 im Register `ERR` gesetzt.

Beispiel:

```
SET    R1  1      # R1 ← 1
SET    R2  2      # R2 ← 2
ADD    R3  R1  R2  # R3 ← R1 + R2 = 1 + 2 = 3
#      X   Y   Z
SET    R2 -2      # R2 ← -2
ADD    R3  R3  R2  # R3 ← R3 + R2 = 3 + (-2) = 1
ADD    R3  R4   5  # Fehler! 5 kein Register
```

Vorzeichenlose Addition wird durch den Befehl `ADDU` ausgeführt.

3.4.2 ADDU

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
ADDU	$X, Y, Z \in \mathcal{R}$	0x31	RRR

„Add Unsigned“. Vorzeichenlose Addition der Registerinhalte $\$Y$ und $\$Z$. Das Ergebnis wird in das Register X gespeichert. Enthält $\$Y$ oder $\$Z$ ein Vorzeichen (höchstwertiges Bit auf 1 gesetzt), so wird es nicht als solches interpretiert, sondern als Wertigkeit, die zum Betrag des Wertes hinzuaddiert wird ($+2^{31}$).

```
SET    R1  1      # R1 ← 1
SET    R2 -2      # R2 ← -2
ADDU   R3  R1  R2  # R3 ← (1 + 2 + 231) = 2147483651
```

Fehler Wie bei `ADD`.

3.4.3 ADDI

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
ADDI	$X, Y \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{Z}$	0x32	RRN

„Add Immediate“. Hinzuaddieren eines festen vorzeichenbehafteten ganzzahligen Wert N zum Inhalt des Registers Y und speichern des Ergebnisses in das Register X . Entspricht dem algebraischen Ausdruck

$$X \leftarrow \$Y + N$$

N wird als vorzeichenbehaftete 8-Bit Zahl in Zweierkomplement-Darstellung interpretiert und kann entsprechend Werte von -128 bis 127 aufnehmen.

Beispiel:

```
SET    R1 1      # R1 ← 1
ADDI   R2 R1 2    # R2 ← R1 + 2 = 1 + 2 = 3
#      X  Y  N
ADDI   R2 R2 -3    # R2 ← R2 + (-3) = 3 + (-2) = 1
ADDI   R2 R3 R4    # Fehler! R4 kein n ∈ ℤ
```

Fehler Wie bei [ADD](#).

3.4.4 SUB

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
SUB	$X, Y, Z \in \mathcal{R}$	0x33	RRR

Subtrahiert die Registerinhalte von $\$Y$ und $\$Z$ und speichert das Ergebnis in das Register X . Entspricht dem Ausdruck

$$X \leftarrow (\$Y - \$Z)$$

Wobei X , Y und Z Register sind.

3.4.5 SUBU

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
SUBU	$X, Y, Z \in \mathcal{R}$	0x34	RRR

„Subtract Unsigned“. Analog zur Instruktion [SUB](#) mit dem Unterschied, dass alle Werte und Operationen vorzeichenlos sind.

3.4.6 SUBI

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
SUBI	$X, Y \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{Z}$	0x35	RRN

„Subtract Immediate“. Funktioniert wie [SUB](#) aber N ist eine direkt angegebene Zahl (kein Register).

Beispiel Folgendes Beispiel demonstriert die Verwendung von [SUBI](#) und zeigt zugleich einen Fehler.

```
SET  R1 50      # R1 ← 50
SUBI R2 R1 30    # R2 ← (R1 - 30) = 20
SUBI R2 R1 R1    # Fehler! da R1 ∉ ℤ
```

3.4.7 MUL

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
MUL	$X, Y \in \mathcal{R}$	0x38	RR0

„Multiply“. Multipliziert die Inhalte der Register X und Y und speichert das Ergebnis in die Spezialregister HI und LO. Diese zwei Spezialregister werden als eine 64-Bit Einheit betrachtet, wobei jedes eine Hälfte des 64-Bit Ergebnisses enthält. Dabei werden die höchstwertigen 32 Bit des Ergebnisses in das Register HI (high) und die 32 niedrigstwertigen Bits des Ergebnisses in das Register LO (low) gespeichert. Siehe auch die Tabelle [2.1](#) auf der Seite [14](#).

Falls das Ergebnis der Multiplikation gänzlich in den 32 Bit des Registers LO passt, wird das Register HI trotzdem auf Null gesetzt.

Äquivalenter algebraischer Ausdruck:

$$(HI, LO) \leftarrow \$X \cdot \$Y$$

Beispiel Der folgende Code demonstriert die Verwendung der MUL Instruktion.

```

SET  R1 4    #  $R1 \leftarrow 4$ 
SET  R2 5    #  $R2 \leftarrow 5$ 
MUL  R1 R2    #  $HI \leftarrow 0$ 
                #  $LO \leftarrow 20$ 

SET  R1 0xAAAAAAAA
MUL  R1 R1    #  $R1^2$ 
                #  $HI = 0x71C71C70$ 
                #  $LO = 0xE38E38E4$ 

COPY R2 LO    #  $R1^2 \bmod 2^{32}$ 

```

3.4.8 Mulu

Assemblernamen	Parameter	Maschinencode	Format
MULU	$X, Y \in \mathcal{R}$	0x39	RRO

„Multiply Unsigned“. Funktioniert wie die Instruktion [MUL](#) mit dem Unterschied, dass die Multiplikationsopeanden $\$X$ und $\$Y$ vorzeichenlos behandelt werden.

3.4.9 MULI

Assemblernamen	Parameter	Maschinencode	Format
MULI	$X \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{Z}$	0x3A	RNN

„Multiply Immediate“. Multipliziert den Inhalt des Registers X mit der ganzen Zahl N und speichert das 64-Bit Ergebnis in die Register HI und LO , die als ein einziges 64-Register betrachtet werden: HI enthält die ersten 32 Bits (die höchstwertigen) und LO die letzten 32 Bits (die niedrigstwertigen). Siehe auch die Instruktion [MUL](#).

$$(HI, LO) \leftarrow \$X \cdot N$$

Das N mit 16 Bit (2 Byte gemäß Format [RNN](#)) dargestellt wird, kann es nur Werte zwischen -2^{15} und $2^{15} - 1$ annehmen (Zweierkomplement).

3.4.10 DIV

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
DIV	$X, Y \in \mathcal{R}$	0x3B	RR0

„Divide“, ganzzahlige Division. Dividiert den Inhalt des Registers X durch den Inhalt des Registers Y und speichert den Quotient in das Register HI und den Rest in das Register LO. Nach der Ausführung gilt

$$\$X = \$Y \cdot \$HI + \$LO$$

Algebraisch ausgedrückt:

$$HI \leftarrow \lfloor \$X / \$Y \rfloor$$

$$LO \leftarrow \$X \bmod \$Y$$

$\lfloor x \rfloor$ bedeutet in diesem Kontext, dass x auf die betragsmässig nächstkleinste ganze Zahl gerundet wird, oder die Nachkommastellen von x werden abgeschnitten (integer division).

Fehler Falls der Wert im Register Y gleich Null ist, wird der Interrupt mit Nummer 1 erzeugt (Division durch Null) und das Bit mit Nummer 0 im Register ERR gesetzt.

Beispiel Der folgende Code demonstriert die Verwendung von DIV.

```
SET R1 10    # R1 ← 10
SET R2 3     # R2 ← 3
DIV R1 R2    # HI ← 3
              # LO ← 1
```

3.4.11 DIVU

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
DIVU	$X, Y \in \mathcal{R}$	0x3C	RR0

„Divide Unsigned“. Funktioniert wie **DIV** mit dem Unterschied, dass ganzzahlige vorzeichenlose Division durchgeführt werden. Die Ergebnis-Register HI und LO enthalten entsprechend vorzeichenlose Werte. Mit anderen Worten:

$$\$X, \$Y, \$LO, \$HI \in \mathbb{N} \bmod 2^{32}$$

3.4.12 DIVI

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
DIVI	$X \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{Z}_{\setminus 0}$	0x3D	RNN

„Divide Immediate“. Dividiert den Inhalt des Registers X durch die feste ganze Zahl N und speichert den Quotient in das Register **HI** und den Rest in das Register **LO**. N nimmt Werte aus dem Intervall $[-2^{15}, 2^{15} - 1] \setminus 0$. Nach der Durchführung der Division gilt:

$$\$X = \$HI \cdot N + \$LO$$

Beispiel Der folgende Code demonstriert die Verwendung von DIVI.

```
SET  R1 10    # R1 ← 10
DIVI R1  3    # HI ← 3
                # LO ← 1
```

Fehler Wie [DIV](#).

3.4.13 ABS

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
ABS	$X, Y \in \mathcal{R}$	0x40	RR0

„Absolute“. Speichert den absoluten Wert des Registers Y in das Register X . Algebraisch ausgedrückt:

$$X \leftarrow \begin{cases} Y & \text{falls } \$Y \geq 0 \\ (-1) \cdot Y & \text{falls } \$Y < 0 \end{cases}$$

oder

$$X \leftarrow (|\$Y| \bmod 2^{31})$$

3.4.14 NEG

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
NEG	$X, Y \in \mathcal{R}$	0x41	RR0

„Negate“. Wechselt das arithmetische Vorzeichen des Registers Y und speichert das Ergebnis in das Register X . Entspricht der Zweierkomplement Bildung. Algebraische Schreibweise:

$$X \leftarrow ((-1) \cdot \$Y)$$

Um eine bitweise Inversion zu erreichen (Einerkomplement), siehe die Instruktion [NOT](#).

3.4.15 INC

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
INC	$X \in \mathcal{R}$	0x42	R00

„Increment“. Inkrementiert den Inhalt des Registers X .

$$X \leftarrow (\$X + 1)$$

3.4.16 DEC

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
DEC	$X \in \mathcal{R}$	0x43	R00

„Decrement“. Dekrementiert den Inhalt des Registers X .

$$X \leftarrow (\$X - 1)$$

3.4.17 MOD

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
MOD	$X, Y, Z \in \mathcal{R}$	0x48	RRR

Modulo Operation. Berechnet den Rest der Division $\$Y/\Z und speichert den Rest in das Register X . Dabei ist das Ergebnis immer positiv.

Algebraische Schreibweise:

$$X \leftarrow \$Y \bmod \$Z$$

3.4.18 MODI

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
MODI	$X, Y \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{N}$	0x49	RRN

„Modulo Immediate“. Analog zur Instruktion [MOD](#), berechnet MODI den Rest der ganzzahligen Division $\$Y/N$ und speichert ihn in das Register X . Der Unterschied liegt darin, dass N eine fest angegebene natürliche Zahl ist.

$$X \leftarrow \$Y \bmod N$$

3.5 Logische Instruktionen

3.5.1 AND

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
AND	$X, Y, Z \in \mathcal{R}$	0x50	RRR

Berechnet bitweise $\$Y \wedge \Z (und-Verknüpfung) und speichert das Ergebnis in das Register X .

$$X \leftarrow (\$Y \wedge \$Z)$$

3.5.2 ANDI

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
ANDI	$X, Y \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{N}$	0x51	RRN

„And Immediate“. Berechnet bitweise $\$Y \wedge N$ (und-Verknüpfung) und speichert das Ergebnis in das Register X . N ist dabei eine feste natürliche Zahl aus dem Bereich $[0, 255]$. Wird eine größere Zahl angegeben, so wird sie modulo 256 berechnet – mit anderen Worten, nur das letzte Byte zählt. Andere Schreibweise:

$$X \leftarrow (\$Y \wedge (N \bmod 256))$$

Bemerkung Die natürliche Zahl N wird auf die Länge von 32 Bit mit Nullen verlängert (Links-Verlängerung). Deshalb setzt diese Instruktion alle Bits mit Wertigkeiten von 2^8 bis 2^{31} im Register X auf Null.

Beispiel für die Verwendung von **ANDI**:

```
SET   R1      0x0102
ANDI  R2 R1 0x01    # R2 = 0
```

3.5.3 OR

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
OR	$X, Y, Z \in \mathcal{R}$	0x52	RRR

Berechnet bitweise $\$Y \vee \Z (oder-Verknüpfung) und speichert das Ergebnis in das Register X .

$$X \leftarrow (\$Y \vee \$Z)$$

3.5.4 ORI

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
ORI	$X, Y \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{N}$	0x53	RRN

„Or Immediate“. Berechnet wie **OR** ein bitweises „oder“ zwischen $\$Y$ und N und speichert das Ergebnis in das Register X . Dabei wird die natürliche Zahl $N \in [0, 255]$ auf die Länge von 32 Bit mit Nullen verlängert (Links-Verlängerung). Wird für N ein Wert größer als 255 angegeben, so wird er modulo 256 berechnet.

$$X \leftarrow (\$Y \vee (N \bmod 256))$$

3.5.5 XOR

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
XOR	$X, Y, Z \in \mathcal{R}$	0x54	RRR

Berechnet bitweise $\$Y \oplus \Z (xor-Verknüpfung) und speichert das Ergebnis in das Register X .

$$X \leftarrow (\$Y \oplus \$Z)$$

3.5.6 XORI

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
XORI	$X, Y \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{N}$	0x55	RRN

„Xor Immediate“. Analog zur Instruktion [XOR](#) mit dem Unterschied, dass N eine direkt angegebene Zahl aus dem Intervall $[0, 255]$ ist.

$$X \leftarrow (\$Y \oplus (N \bmod 256))$$

3.5.7 NOT

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
NOT	$X, Y \in \mathcal{R}$	0x56	RR0

Invertiert alle Bits aus dem Register Y und speichert das Ergebnis in das Register X . Entspricht der Einerkomplement-Bildung.

$$X \leftarrow \overline{\$Y}$$

oder

$$X \leftarrow \neg \$Y$$

Beispiel Der folgende Code invertiert alle Bits aus dem Register $R2$ und speichert das Ergebnis in das Register $R1$.

```
| NOT R1 R2 # R1 ←  $\overline{R2}$ 
```

3.5.8 NOTI

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
NOTI	$X \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{N}$	0x57	RNN

„Not Immediate“. Wie die Instruktion **NOT** aber N ist eine natürliche Zahl aus dem Intervall $[0, 2^{15} - 1]$. Diese konstante Zahl nach links auf die Länge von 32 Bit mit Nullen verlängert.

Beispiel Der folgende Code invertiert alle Bits der Zahl 5 und speichert das Ergebnis in das Register $R1$.

```
| NOT R1 5 # R1 ← 5̄
```

3.5.9 NAND

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
NAND	$X, Y, Z \in \mathcal{R}$	0x58	RRR

Berechnet $\$Y \bar{\wedge} \Z (nand-Verknüpfung) und speichert das Ergebnis in das Register X . Gemäß dem Format **RRR** sind X , Y und Z Register. Algebraische Schreibweise:

$$X \leftarrow (\$Y \bar{\wedge} \$Z)$$

oder

$$X \leftarrow \overline{(\$Y \wedge \$Z)}$$

3.5.10 NANDI

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
NANDI	$X, Y \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{N}$	0x59	RRN

„Nand Immediate“. Berechnet eine nand-Verknüpfung zwischen dem Inhalt des Registers Y und der konstanten Zahl N und speichert das Ergebnis in das Register X . $N \in [0, 255]$.

$$X \leftarrow (\$Y \bar{\wedge} (N \bmod 256))$$

3.5.11 NOR

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
NOR	$X, Y, Z \in \mathcal{R}$	0x5A	RRR

Verknüpft bitweise die Inhalte der Register Y und Z mit der nor-Operation und speichert das Ergebnis in das Register X . „nor“ ist die Negation von „or“.

$$X \leftarrow (\$Y \nabla \$Z)$$

| NOR R1 R2 R3 # $R1 \leftarrow \overline{R2 \vee R3}$

3.5.12 NORI

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
NORI	$X, Y \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{N}$	0x5B	RRN

„Nor Immediate“. Analog zur Instruktion [NOR](#) mit dem Unterschied, dass N eine konstante Zahl aus dem Bereich $[0, 255]$ ist. Diese Zahl wird modulo 256 berechnet und auf der linken Seite auf die Länge von 32 Bit mit Nullen aufgefüllt.

3.5.13 SHL

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
SHL	$X, Y, Z \in \mathcal{R}$	0x60	RRR

„Shift Left“. Verschiebt die Bits aus dem Register Y $\$Z$ Stellen nach links und speichert das Ergebnis in das Register X . Auf der rechten Seite wird X mit Nullen aufgefüllt.

Die Stellenangabe im Register Z muss positiv sein, bzw. wird als eine vorzeichenlose Zahl interpretiert. $\$Z \in \mathbb{N}$.

Andere Schreibweise:

$$X \leftarrow \$Y << \$Z$$

oder

$$X \leftarrow (\$Y \cdot 2^{\$Z}) \bmod 2^{32}$$

3.5.14 SHLI

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
SHLI	$X, Y \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{N}$	0x61	RRN

„Shift Left Immediate“. Verschiebt die Bits im Register Y N Stellen nach links und speichert das Ergebnis in das Register X . N ist eine positive Zahl im Bereich $[0, 255]$. Anstelle der nach links verschobenen Bits werden Nullen aufgefüllt.

N muss positiv sein und es wird als solches interpretiert: $N \in \mathbb{N}$.

3.5.15 SHR

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
SHR	$X, Y, Z \in \mathcal{R}$	0x62	RRR

„Shift Right logical“. Verschiebt die Bits aus dem Register Y $\$Z$ Stellen nach rechts und speichert das Ergebnis in das Register X . Anstelle der verschobenen Bits werden im Register X auf der linken Seite Nullen aufgefüllt. Gemäß dem Instruktionsformat [RRR](#) sind X , Y und Z Register. Alle Register-Inhalte werden vorzeichenlos interpretiert: $\$X, \$Y, \$Z \in \mathbb{N}$.

$$X \leftarrow (\$Y >> \$Z)$$

Bemerkung Wird in dem Register Y eine negative Zahl gespeichert, so löscht diese Verschiebung das Vorzeichen, da auf der linken Seite Nullen aufgefüllt werden. Um das Vorzeichen zu behalten, sollte man die Instruktion **SHRA** verwenden.

Beispiel Der folgende Code verschiebt die Bits im $R1$ eine Stelle nach rechts. Es wird praktisch $R3 \leftarrow (5 \div 2)$ berechnet.

```
SET  R1 5      #  $R1 \leftarrow 5$ 
SET  R2 1      #  $R2 \leftarrow 1$ 
SHR  R3 R1 R2   #  $R3 \leftarrow 2$ 
```

3.5.16 SHRI

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
SHRI	$X, Y \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{N}$	0x63	RRN

„Shift Right Immediate“. Das Bitmuster im Register Y wird N Stellen nach rechts verschoben und das Ergebnis in das Register X gespeichert. Dabei ist N eine positive natürliche Zahl aus dem Intervall $[0, 255]$. Auf der linken Seite werden die versetzten Bits mit Nullen ersetzt. Siehe auch **SHRAI**.

$$X \leftarrow (\$Y \gg N)$$

3.5.17 SHRA

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
SHRA	$X, Y, Z \in \mathcal{R}$	0x64	RRR

„Shift Right Arithmetical“. Funktioniert wie die Instruktion **SHR** mit dem Unterschied, dass auf der linken Seite nicht mit Nullen, sondern mit dem ersten (höchstwertigen) Bit aufgefüllt wird. Dies führt dazu, dass das Vorzeichenbit in Y erhalten bleibt.

3.5.18 SHRAI

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
SHRAI	$X, Y \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{N}$	0x65	RRN

„Shift Right Arithmetical Immediate“. Wie [SHRA](#), N ist aber eine natürliche Zahl aus dem Intervall $[0, 255]$.

3.5.19 ROTL

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
ROTL	$X, Y, Z \in \mathcal{R}$	0x68	RRR

„Rotate Left“. Die Bits aus dem Register Y werden $\$Z$ Stellen nach links „rotiert“ und das Ergebnis in das Register X gespeichert.

$$X \leftarrow \$Y \circlearrowleft \$Z$$

Der Registerinhalt $\$Z$ wird als vorzeichenlose Zahl interpretiert: $\$Z \in \mathbb{N}$.

Die Rotation bedeutet, dass die Bits nach links verschoben werden und diejenigen Bits, die über die linke Grenze hinausfallen auf der rechten Seite wieder eingefügt werden. Dies bedeutet, dass mit jedem verschobenen Bit, ein Bit ganz links (Wertigkeit 2^{31}) fällt aus und wird wieder ganz rechts mit Wertigkeit 2^0 eingefügt. Nach 32 Rotationen eine Stelle nach links ist das ursprüngliche Bitmuster wieder hergestellt.

Beispiel Der folgende Code zeigt ein Beispiel für die Verwendung dieser Instruktion.

```

SET  R1 2
SET  R2 1
ROTL R3 R1 R2      # links-rotation von R1 eine Stelle
                        # R3 = 4
SET  R1 0x80000000 # nur das linke Bit gesetzt
ROTL R4 R1 R2      # R4 = 0x01
```

3.5.20 ROTLI

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
ROTLI	$X, Y \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{N}$	0x69	RRN

„Rotate Left Immediate“. Wie [ROTL](#) aber N ist eine konstante Zahl aus dem Intervall $[0, 255]$.

Beispiel Verwendung:

```
ROTL R4 R1 6 # rotiere die Bits in R1 6 stellen
ROTL R4 R1 -6 # Fehler! da  $-6 \notin \mathbb{N}$ 
```

3.5.21 ROTR

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
ROTR	$X, Y, Z \in \mathcal{R}$	0x6A	RRR

„Rotate Right“. Funktioniert genauso wie die Instruktion [ROTL](#) mit dem Unterschied, dass die Rotationen (Verschiebungen) nach rechts geführt werden.

$$X \leftarrow \$Y \circlearrowright \$Z$$

3.5.22 ROTRI

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
ROTRI	$X, Y \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{N}$	0x6B	RRN

„Rotate Right Immediate“. Funktioniert genauso wie [ROTLI](#), nur die Rotationen sind nach rechts geführt.

3.6 Vergleichsinstruktionen

Die Vergleichsinstruktionen vergleichen den Inhalt eines Registers mit dem Inhalt eines anderen Registers oder mit einer angegebenen ganzen Zahl. Das Ergebnis der Vergleichsinstruktion wird in das Register **CMPR** gespeichert (siehe auch Tabelle 2.1 auf der Seite 14). Dieses Ergebnis ist -1 , 0 oder $+1$ und wird folgenderweise berechnet: werden zwei Werte x und y verglichen, so wird das Register **CMP** wie folgt gesetzt:

$$CMPR \leftarrow \begin{cases} -1 & \text{falls } x < y \\ \pm 0 & \text{falls } x = y \\ +1 & \text{falls } x > y \end{cases}$$

3.6.1 CMP

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
CMP	$X, Y \in \mathcal{R}$	0x70	RR0

„Compare“. Vergleicht die Inhalte der Register X und Y .

3.6.2 CMPU

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
CMPU	$X, Y \in \mathcal{R}$	0x71	RR0

„Compare Unsigned“. Vergleicht analog zu **CMP** – aber vorzeichenlos – $\$X$ mit $\$Y$ (die Inhalte der Register X und Y werden als vorzeichenlose Werte ausgewertet, $\$X, \$Y \in \mathbb{N}$).

3.6.3 CMPI

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
CMPI	$X \in \mathcal{R}, N \in \mathbb{Z}$	0x72	RNN

„Compare Immediate“. Vergleicht $\$X$ mit angegebenen festen Wert N . Dabei nimmt N Werte aus dem Intervall $[-2^{15}, 2^{15} - 1]$.

3.7 Sprungbefehle

Alle Sprungbefehle, außer dem **GO** Befehl, veranlassen einen relativen Sprung im Programmcode – relativ im Sinne, dass die Parameter der Sprungbefehle einen ganzzahligen (negativen oder positiven) Versatz zur aktuellen Programmadresse angeben. Dabei bedeutet der Versatz, oder Offset, die wievielte Instruktionen muss als nächste ausgeführt werden. Zum Beispiel die Instruktion

```
| JMP 2
```

bedeutet „Die zweite Instruktion nach dieser soll ausgeführt werden“. Also es wird eine Instruktion übersprungen, und mit der zweiten fortgefahren. Die Instruktion

```
| BE -5
```

bedeutet „Falls das Register **CMPR** den Wert 0 hat, überspringe 4 Instruktionen zurück (da negativ) und fahre mit der 5. fort“, also die 5. Instruktion zurück.

In dem Programm

```
| SET R1 1
| SET R2 2
| JMP -2
```

bewirkt der **JMP**-Befehl einen Sprung an die erste Instruktion zurück, also an die zweite zurück.

Der Sprungversatz (Offset) wird stets nicht in Bytes angegeben, sondern in Instruktionen – wobei eine Instruktion der UMach Maschine 4 Bytes beträgt. Die Maschine multipliziert diese Anzahl mit 4, um die richtige Programmadresse zu berechnen.

Die Sprungbefehle bauen auf die Vergleichsbefehle auf (Abschnitt 3.6): jeder Sprungbefehl (außer **JMP** und **GO**) untersuchen das Spezialregister **CMPR** und verzweigen die Programmausführung anhand seines Wertes.

Bemerkung Es ist zu bemerken, dass die hier verwendeten numerischen Versatzwerte sich auf die interne Funktionsweise der UMach Maschine beziehen. Ein Assembler könnte solche numerische Angaben für ungültig erklären und statt dessen, textuelle Sprungmarken erwarten (Labels).

3.7.1 BE

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
BE	$N \in \mathbb{Z}$	0x80	NNN

„Branch Equal“. Wenn das Register **CMP** den Wert 0 hat, wird zur N -ten Instruktion vorwärts oder rückwärts gesprungen. Ein negatives N bedeutet einen Sprung rückwärts, ein positives N bewirkt einen Sprung vorwärts. Der Sprung wird dadurch erreicht, dass das Register **PC** gemäß der folgenden Formel modifiziert wird:

$$PC \leftarrow \$PC + 4 \cdot N$$

$$PC \leftarrow \$PC - 4$$

Die Multiplikation mit 4 wird deshalb ausgeführt, weil ein Befehl immer aus 4 Bytes besteht, sodass der Adressoffset zwischen zwei Befehlen immer 4 ist.

Die Subtraktion von 4 wird deshalb ausgeführt, weil die Maschine nach jeder Instruktion das Register **PC** automatisch um 4 inkrementiert, so dass eine Korrektur gebraucht wird.

Fehler Falls das Sprungziel eine Speicheradresse ist, die außerhalb des Speicherbereichs liegt, wird der Interrupt mit Nummer 16 generiert (ungültige Speicheradresse) und das Bit mit Nummer 8 im Register **ERR** gesetzt (siehe auch Tabelle 2.2 auf Seite 15).

Beispiel Der folgende Code lädt zwei Bytes in die Register **R2** und **R3** und addiert diese arithmetisch, falls sie ungleiche Werte haben. Sind die Werte gleich, wird stattdessen der Inhalt von **R2** mit 2 multipliziert. Ein möglicher arithmetischer Überlauf wird nicht berücksichtigt.

```

SET    R1 100      # R1 = 100
LB     R2 R1        # Lade Byte von Adresse 100 nach R2
INC    R1           # R1++, R1 = 101
LB     R3 R1        # Lade Byte von Adresse 101 nach R3
CMP    R2 R3        # Vergleiche Inhalt von R2 und R3
                        # Ergebnis geht ins CMPR
#BE    equal        # Asm Schreibweise
BE     5             # Wenn CMPR gleich 0 ist, springe
                        # zur 5. Instruktion (MULI)
                        # (gehe zum label equal)
ADD    R2 R2 R3     # Addiere Inhalt von R2 und R3
```

```

DEC    R1          # R1--, R1 = 100
SB     R2 R1       # Speichere R2 nach Adresse 100
#JMP   finish      # Asm Schreibweise
JMP    3           # Gehe zur 3. Instruktion (label finish)

equal:
  MULI  R2 2       # Multipliziere Inhalt von R2 mit 2
  SB    L0 R1      # Speichere Inhalt von L0 nach Adresse in R1
finish:
  EOP

```

3.7.2 BNE

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
BNE	$N \in \mathbb{Z}$	0x81	NNN

„Branch Not Equal“. Entspricht dem Verhalten von [BE](#) mit dem Unterschied, dass der angegebene Sprung ausgeführt wird, wenn `CMPR` nicht 0 ist.

Fehler Wie bei der Instruktion [BE](#).

3.7.3 BL

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
BL	$N \in \mathbb{Z}$	0x82	NNN

„Branch Less“. Springt zur N -ten Instruktion, wenn der Inhalt von `CMPR` kleiner 0 ist.

Fehler Wie bei der Instruktion [BE](#).

3.7.4 BLE

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
BLE	$N \in \mathbb{Z}$	0x83	NNN

„Branch Less Equal“. Springt zur N -ten Instruktion, wenn der Inhalt von **CMPR** kleiner oder gleich 0 ist.

Fehler Wie bei der Instruktion [BE](#).

3.7.5 BG

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
BG	$N \in \mathbb{Z}$	0x84	NNN

„Branch Greater“. Springt zur N -ten Instruktion, wenn der Inhalt von **CMPR** größer als 0 ist.

Fehler Wie bei der Instruktion [BE](#).

3.7.6 BGE

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
BGE	$N \in \mathbb{Z}$	0x85	NNN

„Branch Greater Equal“. Springt zur N -ten Instruktion, wenn der Inhalt von **CMPR** größer oder gleich 0 ist.

Fehler Wie bei der Instruktion [BE](#).

3.7.7 JMP

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
JMP	$N \in \mathbb{N}$	0x88	NNN

„Jump“. Springt zur N -ten Instruktion, unabhängig vom Wert des Registers *CMPR*.

Fehler Wie bei der Instruktion [BE](#).

3.8 Unterprogramminstruktionen

3.8.1 GO

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
GO	$X \in \mathcal{R}$	0x90	R00

Setzt PC auf die angegebene absolute Adresse. Hierbei ist zu beachten, dass nicht in die Mitte eines Befehles gesprungen wird. Dies zu gewährleisten liegt in der Verantwortung des Programmierers (die Maschine prüft nicht, ob die angegebene Adresse $\$X$ ein Vielfaches von 4 ist).

$$PC \leftarrow \$X$$

Fehler Falls das Sprungziel $\$X$ eine Speicheradresse ist, die außerhalb des Speicherbereichs liegt, wird der Interrupt mit Nummer 16 generiert (ungültige Speicheradresse) und das Bit mit Nummer 8 im Register **ERR** gesetzt (siehe auch Tabelle [2.2](#) auf Seite [15](#)).

3.8.2 CALL

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
CALL	$N \in \mathbb{N}$	0x91	NNN

Funktioniert wie der Befehl [GO](#) mit dem Unterschied, dass bevor PC neugesetzt wird, wird es auf den Stack gepusht. Entspricht

$$\begin{aligned} &\text{PUSH } PC \\ &PC \leftarrow N \end{aligned}$$

Dieser Befehl dient der Implementierung und Verwendung von Funktionen (function call).

Fehler Wie bei dem Befehl [GO](#).

3.8.3 RET

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
RET	keine	0x92	000

POPt eine Adresse vom Stack in das Register PC. Dieser Befehl entspricht einem Rückkehr aus einer Subroutine, analog der Anweisung `return` aus den höheren Programmiersprachen.

POP PC

Fehler Wie bei der **POP** Operation.

3.9 Systeminstruktionen

3.9.1 INT

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
INT	$N \in \mathbb{N}$	0xA0	NNN

„Interrupt“. Generiert ein Interrupt in der Programmausführung. Falls die Interruptnummer N keine von der Maschine erkannte Interruptnummer ist, wird der Interrupt mit Nummer 0 ausgeführt (Maschine ausschalten). Für mehr Informationen betreffend das Interrupt-System der UMach Maschine siehe den Abschnitt 2.6 auf der Seite 20.

3.10 IO Instruktionen

3.10.1 IN

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
IN	$A, N, P \in \mathcal{R}$	0xB0	RRR

Veranlasst die I/O-Einheit, $\$N$ Bytes Daten aus dem Gerät am Port $\$P$, zum Speicher ab der Adresse $\$A$ zu übertragen. A , N und P sind Register.

$$\text{read}(\$P) \rightarrow \text{mem}_{\$N}(\$A)$$

Dieser Befehl blockiert den Kern solange, bis entweder $\$N$ Bytes gelesen wurden, oder bis das Gerät das Ende der Übertragung signalisiert. Die tatsächliche Anzahl der übertragenen Bytes kann kleiner als $\$N$ sein und wird in das Register N gespeichert.

Fehler Falls $\$P$ keine gültige Portnummer ist, wird der Interrupt mit Nummer 32 generiert und das Bit mit Nummer 16 im Register **ERR** gesetzt. Falls $\$A$ keine gültige Speicheradresse ist, wird der Interrupt mit Nummer 16 generiert und das Bit mit Nummer 8 im Register **ERR** gesetzt.

3.10.2 OUT

Assemblername	Parameter	Maschinencode	Format
OUT	$A, N, P \in \mathcal{R}$	0xB8	RRR

Schreibt $\$N$ Bytes Daten aus dem Speicher mit Adresse $\$A$ an den Port mit Nummer $\$P$. Die Anzahl der tatsächlich geschriebenen Bytes wird zurück in das Register N geschrieben und beträgt 0 bis $\$N$.

Dieser Befehl blockiert den Kern solange, bis die I/O-Einheit fertig mit dem Schreiben ist.

Fehler Wie bei dem Befehl [IN](#).

Beispiel Der folgende Code demonstriert die Benutzung der **IN** und **OUT** Befehle in einem „Hello User“ Programm. Der Benutzer wird nach seinem Namen gefragt und dann wird er namentlich begrüßt.

```
SET R1 prompt    # Adresse der ersten Ausgabe
SET R2 10        # Länge der Ausgabe
SET R3 0         # Portnummer 0
OUT R1 R2 R3     # Ausgeben "Your name: "
```

```
SET R1 name      # Speicheradresse
SET R2 16         # wieviel input maximal
SET R3 0          # Port 0 (Tastatur)
IN  R1 R2 R3      # oder auch IN R1 R2 ZERO
### blockiert bis input fertig ###
### in R2 steht wieviel tatsächlich gelesen ###

SET R4 hello
SET R5 7          # strlen(hello)
OUT R4 R5 R3      # output R5 bytes auf Port 0
OUT R1 R2 ZERO    # "Hello, User"

SET R4 nl
SET R5 1
OUT R4 R5 ZERO    # '\n'

.data
array 16 name
string promptp "Your name: "
string hello   "Hello, "
string nl      "0x10"
```

3.11 Befehlentabelle

Die Tabelle [3.3](#) auf der Seite [61](#) gibt eine Übersicht aller Befehlen, die von der UMach Maschine erkannt und ausgeführt werden.

Tabelle 3.3: Befehlentabelle

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	NOP				EOP			
1	SET	CP	LB	LW	SB	SW		
	PUSH	POP						
2								
3	ADD	ADDU	ADDI	SUB	SUBU	SUBI		
	MUL	MULU	MULI	DIV	DIVU	DIVI		
4	ABS	NEG	INC	DEC				
	MOD	MODI						
5	AND	ANDI	OR	ORI	XOR	XORI	NOT	NOTI
	NAND	NANDI	NOR	NORI				
6	SHL	SHLI	SHR	SHRI	SHRA	SHRAI		
	ROTL	ROTLI	ROTR	ROTRI				
7	CMP	CMPU	CMPI					
8	BE	BNE	BL	BLE	BG	BGE		
	JMP							
9	GO	CALL	RET					
A	INT							
B	IN							
	OUT							
C								
D								
E								
F								
	8	9	A	B	C	D	E	F

4 Debugging

Die virtuelle UMach Maschine stellt eine Debugging-Schnittstelle zur Verfügung. Um diese Schnittstelle zu aktivieren, muss man die Maschine im Debugmodus starten.

Die Schnittstelle besteht aus einer Reihe von Funktionen und aus einer Sammlung von Informationen betreffend den inneren Zustand der Maschine zum Zeitpunkt der Abfrage.

Folgende Funktionen dienen zur Steuerung der Maschine während sie die Ausführung des Programms durchführt:

1. **step**

Führt die aktuelle Instruktion aus, lädt die nächste Instruktion aus dem Speicher und dann wartet.

Die Informationen, die während einer Debug-Session zur Verfügung gestellt werden sind die folgenden:

1. PC, der aktuelle Program-Counter.
2. Aktuelle Instruktion. Diese Instruktion wurde noch nicht ausgeführt.
3. Werte aller Register.
4. Informationen über den Speicher: Größe etc.
5. Ausschnitte aus dem Speicherinhalt.
6. Informationen über die I/O Einheit.

Glossar

[A](#) | [B](#) | [D](#) | [I](#) | [R](#)

A

Assemblername

Der Name eines Registers oder eines Befehls, so wie er in einem textuellen Programm (ASCII) verwendet wird. *R1*, *R2*, *ADD* sind Assemblernamen von Registern und Befehlen.

B

Befehl

Die ersten 8 Bits in einer Instruktion. Operation code.

Befehlsraum

Die Anzahl der möglichen Befehle, abhängig von der Befehlsbreite. Beträgt die Befehlsbreite 8 Bit, so ist der Befehlsraum $2^8 = 256$.

Betriebsmodus

Die Art, wie die UMach Maschine die einzelnen Instruktionen abarbeitet. Siehe auch [2.1.1](#).

Byte

Eine Reihe oder Gruppe von 8 Bit.

D

DMA

Direct Memory Access

I

Instruktion

Eine Anweisung an die UMach VM etwas zu tun. Eine Instruktion besteht aus einem Befehl (Operation Code) und eventuellen Argumenten.

Instruktionsformat

Beschreibt die Struktur einer Instruktion auf Byte-Ebene und zwar es gibt an, ob ein Byte als eine Registerangabe oder als reine numerische Angabe zu interpretieren ist. Siehe [3.1.1](#).

Instruktionssatz

Die Menge aller Instruktionen, die von der UMach Maschine ausgeführt werden können.

R**Register**

Eine sich im Prozessor befindende Speichereinheit. Das Register ist dem Programmierer sichtbar und kann mit Werten geladen werden. Siehe Abschnitt [2.3](#), Seite [12](#).

Registernummer

Eine eindeutige Zahl, die ein Register identifiziert. Eine Instruktion verwendet diese Zahl, wenn sie ein Register angibt.

Index

- \mathcal{R} , 12, 27
- 000, 23
- ABS, 40
- ADD, 34
- ADDI, 35
- ADDU, 35
- Allzweckregister, 13
- AND, 42
- ANDI, 42
- Assemblernamen, 12
- Ausnahmesituation, 20
- BE, 53
- Befehlsraum, 26
 - Verteilung, 26
 - Verteilungstabelle, 27
- Betriebsmodus, 8
- BG, 55
- BGE, 55
- BL, 54
- BLE, 54
- BNE, 54
- Byte Order, 22
- CALL, 56
- CMP, 51
- CMPI, 51
- CMPR (Reg), 15
- CMPU, 51
- CP, 29
- DEC, 41
- DIV, 39
- DIVI, 40
- DIVU, 39
- DMA, 18
- Endianness, 22
- EOP, 28
- ERR, 14, 15
- FP, 14
- GO, 56
- HI, 14, 37
- I/O Einheit, 18
- IN, 57
- INC, 41
- Instruktionen, 22
 - Kategorien, 26
- Instruktionsbreite, 22
- Instruktionsformat, 22
 - 000, 23
 - Liste, 25
 - NNN, 23
 - R00, 23
 - RNN, 24
 - RR0, 24
 - RRN, 24
 - RRR, 25
- Instruktionssatz, 22
- INT, 57
- Interrupt, 20, 57
- Interruptnummer, 17
- Interrupttabelle, 17
- IR, 14
- JMP, 55
- Kern, 12
- lsb*, 28

- LB, 30
- LO, 14, 37
- LW, 30

- MOD, 41
- MODI, 42
- MUL, 37
- MULI, 38
- MULU, 38

- NAND, 45
- NANDI, 45
- NEG, 40
- NNN, 23
- NOP, 28
- NOR, 46
- NORI, 46
- NOT, 44
- Notation, 27
- NOTI, 45
- Null-Register, 13

- Offset, 52
- OR, 43
- ORI, 43
- OUT, 58

- PC, 14
- POP, 33
- Port, 19
- Programm, 17
- Prozess, 18
- PUSH, 33

- R00, 23
- Register, 12
 - Allzweckregister, 13
 - Assemblernamen, 12
 - Null-Register, 13
 - Registernummer, 12
 - Spezialregister, 13
- Registernummer, 12
- RET, 57
- return, 57
- RNN, 24

- Rotation, 49
- ROTL, 49
- ROTLI, 50
- ROTR, 50
- ROTRI, 50
- RR0, 24
- RRN, 24
- RRR, 25

- SB, 31
- SET, 29
- SHL, 46
- SHLI, 47
- SHR, 47
- SHRA, 48
- SHRAI, 49
- SHRI, 48
- SP, 14
- Speicheradresse, 18
- Speichermodell, 16
- Speicherstruktur, 16
- Spezialregister, 13
- Sprungbefehle, 52
- Stack, 17
 - Überlauf, 16, 33
 - Fehler, 15, 34
 - Schrumpfen, 18
 - Wachsen, 18
- STAT, 14
- SUB, 36
- SUBI, 37
- SUBU, 36
- SW, 32

- UMach
 - Aufbau, 8
 - Port, 19
 - Register, 12

- Versatz, 52

- XOR, 43
- XORI, 44

- ZERO, 15