

# UNIVERSITÄT DORTMUND

Fakultät für Elektrotechnik

**Forschungsbericht Nr. 0292**

**Schnell-Ladeverfahren für  
NiCd-Akkumulatoren auf der Basis  
eines Fuzzy-Controllers**

*Dipl. Inform. Hartmut Surmann*

Lehrstuhl für Bauelemente der Elektrotechnik

Forschungsberichte

Universität Dortmund

Fakultät für Elektrotechnik

ISSN 0941-4169

Erscheinungsdatum: 01.07.1992

**Anforderungen an:**

**Lehrstuhl für Bauelemente der Elektrotechnik**

**Prof. Dr.-Ing. Karl Goser**

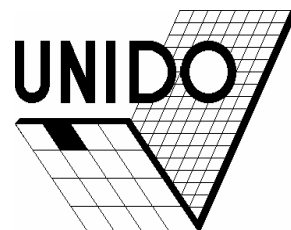
**Universität Dortmund**

**Fakultät für Elektrotechnik**

**Postfach 500 500**

---

**D-4600 Dortmund 50**





---

<b>1. Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2. Grundlagen des unscharfen Reglers</b>	<b>6</b>
2.1. Wozu brauchen wir unscharfe Regler?	6
2.2. Unscharfe Mengen und Zugehörigkeitsfunktionen	7
2.3. Grundoperationen der unscharfen Mengentheorie	8
2.4. Die bedingte Wertzuweisung als Modell einer Steuerregel	9
2.5. Die "compositional rule of inference"	11
2.6. Die Steuerregel bei beliebiger Anzahl von Ein- und Ausgangsvariablen (Multivariablensystem)	12
2.7. Berechnung einer scharfen Ausgangsgröße aus einer unscharfen Ausgangsfunktion (Defuzzifizierung)	13
2.8. Zusammenfassendes Beispiel	15
<b>3. Grundlagen der Nickel-Cadmium-Akkumulatoren</b>	<b>17</b>
3.1. Klassifizierung und Vergleich gebräuchlicher Batterien	17
3.2. Aufbau der NiCd-Zellen	18
3.3. Funktionsweise der NiCd-Akkumulatoren	21
3.4. Eigenschaften der NiCd-Akkumulatoren	23
3.5. Ladecharakteristik	25
3.6. Entladecharakteristik	27
<b>4. Ladeverfahren</b>	<b>27</b>
4.1. Klassifizierung nach Zeitbedarf	28
4.2. Stromregelungsverfahren	29
4.3. Ladeende-Erkennung	30
4.4. Beurteilungskriterien zu Ladeverfahren von NiCd-Akkus	31
<b>5. übersicht Akkuladegeräte</b>	<b>32</b>
5.1. Definition eines mit einem Fuzzy-Controller gesteuerten Ladegerätes	32
<b>6. übersicht Akkuladegeräte</b>	<b>34</b>
6.1. Definition eines mit einem Fuzzy-Controller gesteuerten Ladegerätes	34
<b>7. Aufbau der Regelbasis</b>	<b>36</b>
7.1. Beispiel der Vorgehensweise beim Entwurf der Zugehörigkeitsfunktionen und Regeln	37
7.2. Struktur der Testreihen	38
7.3. Ergebnisse	38

<b>8. Zusammenfassung</b>	<b>64</b>
<b>Angang A:</b>	<b>65</b>
Hardware	65
Software	66
<b>9. Literaturverzeichnis</b>	<b>68</b>

## 1. EINLEITUNG

In den letzten Jahren hat die Nachfrage nach akkubetriebenen Elektrowerkzeugen einen großen Aufschwung erfahren. Nicht nur immer neue und verbesserte Werkzeuge und Akkumulatoren sollen Marktanteile sichern, sondern auch die zugehörigen Ladegeräte werden ständig weiterentwickelt und verbessert. Hierbei sind zwei Trends festzustellen: Zum einen soll die Ladezeit der Akku-Packs immer weiter verkürzt werden, und zum anderen soll das verwendete Ladeverfahren die Akkus möglichst schonend behandeln und universell einsetzbar sein um eine lange Lebensdauer zu erreichen.

Eine kurze Ladezeit setzt hohe Ladeströme voraus, die wiederum erfordern eine genaue Überwachung der Akku-Packs, da diese bei unsachgemäßem Laden dauerhaft geschädigt werden können. Leider ist es bis heute nicht gelungen, ein vollständiges mathematisches Modell des Verhaltens von Nickel-Cadmium-Akkumulatoren während der Aufladephase zu entwickeln. Desweiteren stehen für die Überwachung des Ladevorgangs lediglich die Meßgrößen Temperatur und Batteriespannung zur Verfügung. Die Aufnahme der wichtigen Zustandsgröße Zellendruck kann in der industriellen Großfertigung nicht realisiert werden und steht damit nicht für die Ladeüberwachung zur Verfügung.

Andererseits liegen aber genügend Erfahrungswerte über das Verhalten der Nickel-Cadmium-Akkus bei der Aufladung vor. Diese führten in der Vergangenheit zu Ladeverfahren, die nur unter eingeschränkten Bedingungen und mit einer gewissen Überladung NiCd-Akkumulatoren laden. Wünschenswert wäre ein Ladeverfahren, das ausschließlich auf vorhandenem Erfahrungswissen beruht, einfach zu verstehen und zu realisieren ist und die oben genannten Einschränkungen verbessert. Eine Änderung des Ladeverfahrens bei weiterer Verkürzung der Ladezeiten sollte damit sehr schnell und ohne Leistungseinbußen möglich sein.

Die oben genannten Forderungen und Eigenschaften werden den in den letzten Jahren bekannt gewordenen Fuzzy-Controllern zugeschrieben. Es liegt also nahe, einen Fuzzy-Controller zur Überwachung von Ladevorgängen zu verwenden. Ein Ladegerät auf der Basis eines Fuzzy-Controllers verspricht hohe Flexibilität bei einem Kostenaufwand, welcher herkömmlichen Lösungen mit Mikroprozessoren entspricht. Ein einfaches Austauschen des Regelsatzes genügt, und man erhält ein neues Ladegerät für andere Anwendungen.

Inhalt dieses Forschungsberichts ist die Darstellung eines auf einem Fuzzy-Controller beruhenden Schnell-Ladeverfahrens für Nickel-Cadmium Akkumulatoren, sowie Untersuchungen an verschiedenen Regelbasen. Die Verwendbarkeit der Regelbasen wird an Hand von Versuchsreihen mit verschiedenen Akku-Typen und unter verschiedenen Randbedingungen wie zum Beispiel Füllegrad und Anfangstemperatur dargestellt.

Das zweite Kapitel beschreibt die Grundlagen des verwendeten Fuzzy-Controllers. Im dritten und vierten Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen zum Thema Schnellladung von NiCd-Akkus dargestellt. Im fünften Kapitel wird eine kurze Übersicht über derzeitige Ladegeräte gegeben, um daraus weitere Anforderungen an das mit dem Fuzzy-Controller gesteuerte Ladegerät abzuleiten. Das sechste Kapitel schließlich beschreibt die Vorgehensweise beim Entwurf der Regelbasen und stellt eine funktionsfähige Regelbasis vor.

## GRUNDLAGEN DES UNSCHARFEN REGLERS

### 1.1. Wozu brauchen wir unscharfe Regler?

Unscharfe 1.1.1.Regler<sup>1</sup> werden eingesetzt, um "Faustformeln" und Intuition des menschlichen Experten, der mit der Prozeßsteuerung beschäftigt ist, sowie heuristische Kontrollregeln in eine automatische Regelungsstrategie umzusetzen. Zu diesem Zweck besitzen die fuzzy Steuerregeln die Struktur von Konditionalsätzen, also if-then Regeln bzw. Bedingungen, die ein Mittel zur Darstellung technischer Kontrollprozesse in der betrieblichen Praxis sind. Grundlage eines unscharfen Reglers ist somit kein exaktes mathematisches Modell. Sein Verarbeitungsalgorithmus benutzt eine Menge von lokalen bedingten Wertzuweisungen, die durch die sogenannte "Compositional Rule of Inference", einer Verknüpfungsregel meist auf der Basis einer T-CO-Norm [1] miteinander verknüpft werden.

Im Gegensatz zu konventionellen Reglern, die auf einer Modellierung mit Differentialgleichungen aufbauen und deshalb nur mit "scharfen" Werten arbeiten, wird beim unscharfen Regler mit sogenannten linguistischen Variablen und deren Zugehörigkeitsfunktionen<sup>2</sup> modelliert. Die Zugehörigkeitsfunktionen einer Variablen kann man als (unscharfe) Stützstellen einer physikalischen oder mathematischen Ein- oder Ausgangsgröße betrachten, die mit der menschlichen Ausdrucksweise korrespondiert, weshalb die Variable auch als "linguistisch" bezeichnet wird. Dies erlaubt die Modellierung und Verarbeitung von Adjektiven, wie z.B. "klein", "mittel" oder "groß". Qualitativ setzt sich die Stellgröße bzw. Ausgangsgröße eines unscharfen Reglers aus einem gewichteten Mittel aller bedingten Wertzuweisungen (unscharfen Regeln) zusammen, die bei einem bestimmten Systemzustand zumindest graduell Anwendung finden können. Aufgrund dieses Funktionsprinzips bietet ein unscharfer Regler auch die Option in einfacher Weise ein für manche Anwendungen vorteilhaftes nichtlineares Verhalten, Totzeiten und Hysteresen ohne ein vorgegebenes mathematisches Modell zu realisieren (Modellfreier Schätzer [2]). In der Literatur [1] wird dem unscharfen Regler große Bedeutung bei der automatischen Regelung von Prozessen zugeschrieben, die derzeit entweder zu komplex sind um sie in Echtzeit exakt zu modellieren oder von denen kein exaktes mathematisches Modell existiert. Voraussetzung für die Entwicklung der inversen Transferfunktion ist neben der qualitativen Kenntnis des Systemverhaltens natürlich die prinzipielle Beobachtbarkeit der Ein- und Ausgangsgrößen, wobei sich in den derzeit realisierten Anwendungen gezeigt hat, daß auch verrauschte Eingabedaten zur Charakterisierung des Systems verwendet werden konnten.

Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines zu regelnden Systems mit einem unscharfen Regler. Die Regelstrecke liefert die Meßgrößen, z. B. eine Temperatur oder eine Spannung, die im Zustandsinterface entsprechend aufbereitet oder erweitert werden können, z. B. auf die Temperatur- oder Spannungsänderung. In der Recheneinheit werden dann mit Hilfe der Daten- und Regelbasis die unscharfen Ausgangsmengen ermittelt und im Aktionsinterface in entsprechende Ausgangsgrö-

---

<sup>1</sup> engl. Fuzzy-Controller

<sup>2</sup> engl. membership function

ßen und Aktionen umgesetzt und an die Regelstrecke abgegeben. Zustands- und Aktionsinterface müssen häufig der Hardwareumgebung und dem Problem angepaßt werden. Darauf wollen wir hier nicht weiter eingehen, denn in unserem Interesse steht der unscharfe Regler, wobei die ersten Forschungsarbeiten schon 1965 beginnend von Zadeh [3], dem Begründer der unscharfen Mengenlehre, und Mamdani durchgeführt wurden [4],[5],[6].

Im folgenden werden mit "gewöhnlich" die Eigenschaften einer scharfen Menge<sup>3</sup>, mit "fuzzy" die einer unscharfen Menge<sup>4</sup> beschrieben. Der Begriff "Funktion" wird synonym für "Zugehörigkeitsfunktion" verwendet, mit "Variable" ist stets eine linguistische Variable gemeint.

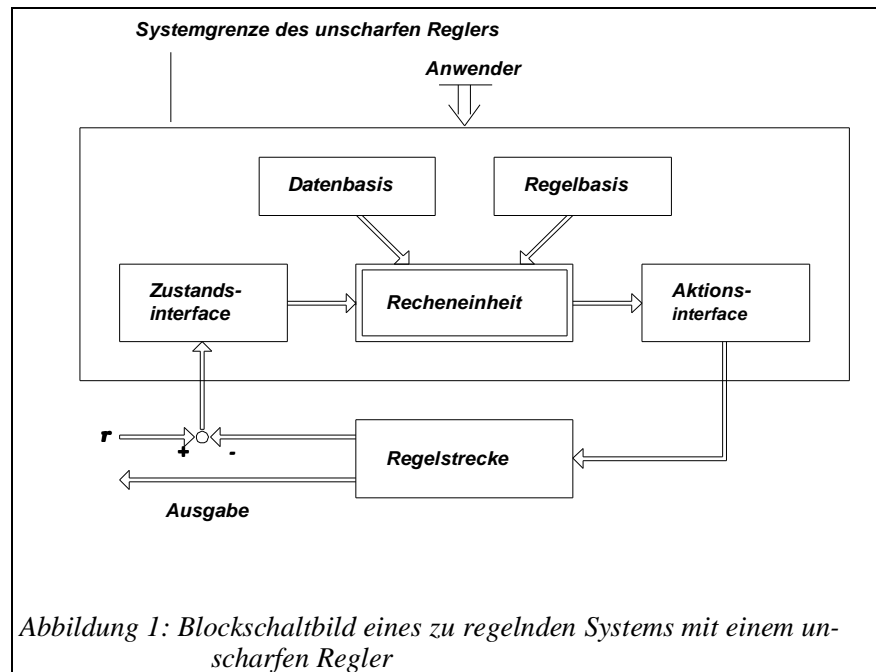


Abbildung 1: Blockschaltbild eines zu regelnden Systems mit einem unscharfen Regler

## 1.2. Unscharfe Mengen und Zugehörigkeitsfunktionen

Eine unscharfe Menge ist eine mathematische Verallgemeinerung der gewöhnlichen Menge. Adjektive wie z.B. "klein", "mittel" oder "groß" können mit unscharfen Mengen besser beschrieben werden. Im Gegensatz zur konventionellen Mengentheorie, bei der die Frage nach der Zugehörigkeit eines Wertes zu einer Menge eine ja/nein- bzw. 1/0-Entscheidung ist (beschrieben durch die sogenannte charakteristische Funktion), gibt es bei einer unscharfen Menge keine scharfe Abgrenzung, sondern kontinuierliche Zugehörigkeitswerte zwischen 0 und 1.

Jede unscharfen Menge  $i$  wird deshalb durch eine Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_i(u)$  definiert, die die Zugehörigkeitsgrade aller Elemente  $u \in U$  (Definitionsbereich<sup>5</sup> von  $u$ ) für die unscharfe Menge  $i$  liefert. Es gilt:

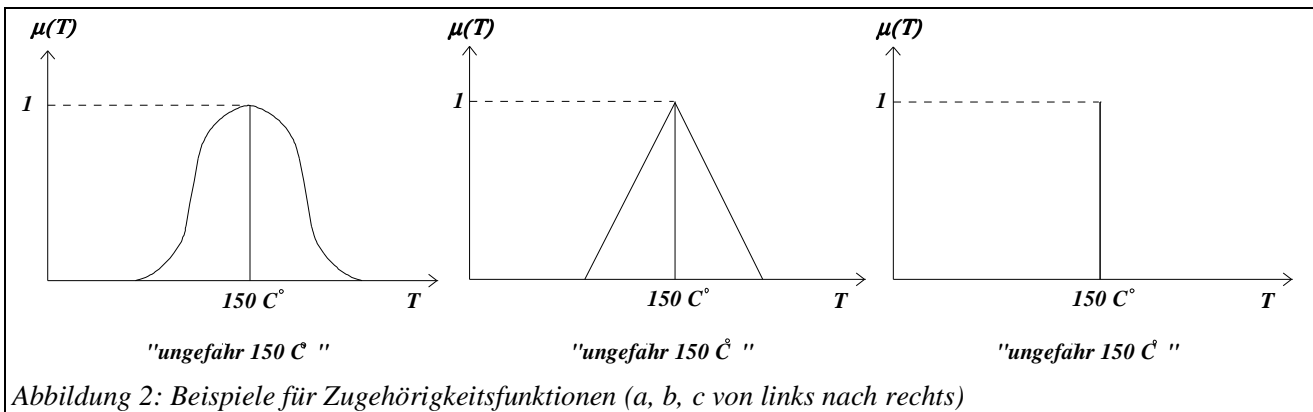
$$\mu_i : U \rightarrow [0, 1], \text{ mit } u \rightarrow \mu_i(u), \text{ d.h. } i = \{(u, \mu_i(u)) \mid u \in U, \mu_i(u) \text{ s.o.}\}$$

Abbildung 2 zeigt einige Beispiele für Zugehörigkeitsfunktionen. Die hier verwendeten unscharfen Mengen sind *normal*, d.h.  $\sup \{\mu(x) \mid x \in U\} = 1$ . Weiterhin sind die in dieser Arbeit verwendeten unscharfen Mengen *konvex*, d.h.  $\mu(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \geq \min(\mu(x_1), \mu(x_2))$  für alle  $x_1, x_2 \in U$  und  $\lambda \in [0, 1]$ . Konvexe unscharfe Mengen sind beispielsweise Funktionen, die bis zu einem maximal Wert monoton steigen und danach monoton fallen. Bei der rechnergestützten Verarbeitung werden unendliche Men-

<sup>3</sup>engl. crisp set

<sup>4</sup> engl. fuzzy set

<sup>5</sup>engl. universe of discourse



gen auf endliche Mengen abgebildet. Im folgenden gehen wir deshalb immer von endlichen Mengen aus.

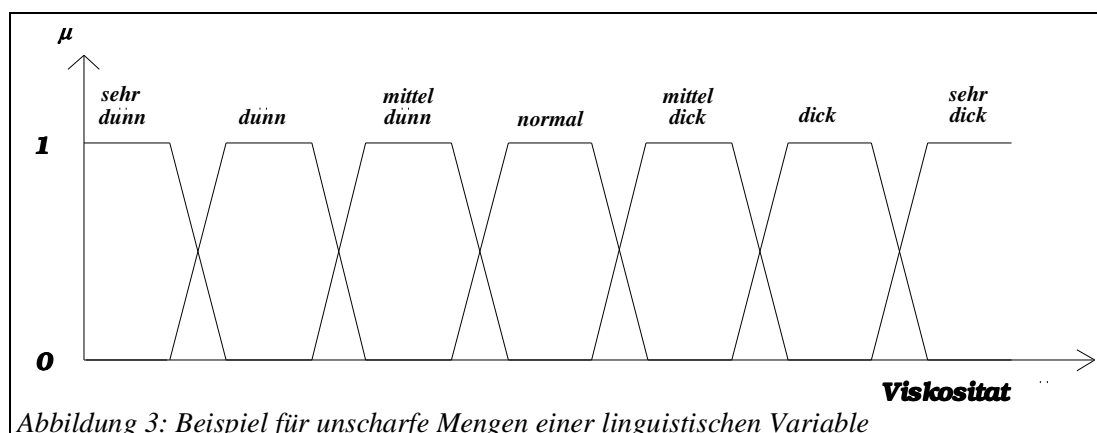
Da sprachliche Relativierungen (Adjektive aber auch Adverbien) nur sehr schwer eindeutig interpretierbar sind überlappen sich die angrenzenden Zugehörigkeitsfunktionen, wie es in Abbildung 3 gezeigt wird. Dieses ist ein wesentlicher Modellierungsvorteil bei der Verwendung unscharfer Mengen und der Grund für das an sich aufwendigere Rechenverfahren. Für eine Eingangsvariable entspricht die Festlegung von Zugehörigkeitsfunktion der Definition von unscharfen Approximationspunkten, die im Gegensatz zu anderen regelbasierten Ansätzen besser linguistisch interpretierbar sind.

Im weiteren werden der Definition der unscharfen Mengen folgend die Begriffe Zugehörigkeitsfunktionen und unscharfe Menge synonym verwendet und mit einem großen Buchstaben (z.B. A für  $\mu_A(u)$ ) bezeichnet.

### 1.3. Grundoperationen der unscharfen Mengentheorie

Die später benötigten Grundoperationen auf unscharfen Mengen [3] sollen an dieser Stelle kurz eingeführt werden. Seien A,B,C unscharfe Mengen,  $u \in U$ , dann wird die neue fuzzy Mengen punktweise durch Anwendung der Operatoren (min, max, 1-) definiert. Es gilt :

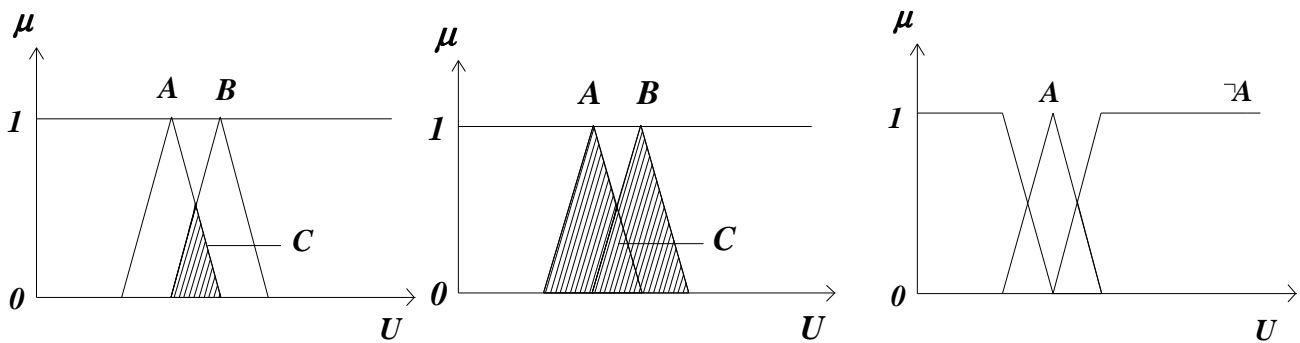
Schnittmengenbildung  $C = A \cap B$  Vereinigung  $C = A \cup B$  Komplement  $\neg A$



$$\mu_C(u) = \min(\mu_A(u), \mu_B(u))$$

$$\mu_C(u) = \max(\mu_A(u), \mu_B(u))$$

$$\mu_{\neg A}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad \forall u \in U$$



Von besonderem Interesse ist, daß die Vereinigungs- und Schnittmengenbildung zweier unscharfer Mengen idempotent ( $A=A \cup A$ ,  $A=A \cap A$ ), kommutativ ( $A \cup B=B \cup A$ ,  $A \cap B=B \cap A$ ), assoziativ ( $(A \cup B) \cup C=A \cup (B \cup C)$ ,  $(A \cap B) \cap C=A \cap (B \cap C)$ ) und distributiv ( $(A \cup B) \cap C=(A \cap C) \cup (B \cap C)$ ,  $(A \cap B) \cup C=(A \cup C) \cap (B \cup C)$ ) sind. Weiterhin gelten die De Morgan'schen Gesetze ( $\neg(A \cup B) = \neg A \cap \neg B$ ,  $\neg(A \cap B) = \neg A \cup \neg B$ ) [7,8]. Im Gegensatz zur konventionellen Mengentheorie gilt in der unscharfen Mengentheorie im allgemeinen  $A \cap \neg A \neq \emptyset$  und  $A \cup \neg A \neq M$ , wobei  $M$  die Universalmenge ( $\mu_M(u) = 1, \forall u \in U$ ) und  $\emptyset$  die Leermenge ( $\mu_{\emptyset}(u) = 0, \forall u \in U$ ) bezeichnet.

### 1.4. Die bedingte Wertzuweisung als Modell einer Steuerregel

Wie schon in der Einführung angedeutet wollen wir statt von unscharfen Regeln von bedingten Wertzuweisungen sprechen. Die Regelstrategie eines (menschlichen) "Prozeß-Steuerers", der einen technischen Prozeß steuert, kann durch sprachlich unpräzise, bedingte Steueranweisungen ausgedrückt werden, die insgesamt eine Menge von jeweils lokal anzuwendenden Steueranweisungen bilden, z.B. könnte eine typische Anweisung zur Temperaturregelung lauten:

"WENN die Temperatur hoch ist, DANN erhöhe die Kühlung."

Hierbei sind "hoch" und "erhöhe" linguistische Bezeichner, die durch unscharfe Mengen über einer physikalischen (oder mathematischen) Größe numerisch exakt definiert sind. Die Lokalitätseigenschaft von "erhöhe die Kühlung" wird durch die Bedingung "Temperatur ist hoch" sichergestellt, wobei mit Temperatur immer der aktuelle Wert der Temperatur gemeint ist. Da außerdem die Struktur der Steueranweisung mit der bedingten (lokalen) Wertzuweisung des unscharfen Reglers nachgebildet wird, kann die Erfahrung des menschlichen Bedieners direkt in einen Steueralgorithmus des unscharfen Reglers abgebildet werden.

Betrachten wir zunächst den einfachsten Fall einer unscharfen Regel mit einer Ein- und einer Ausgangsvariablen. Sie hat folgende Form:

IF (A' IS  $A_i$ ) THEN ( $U_i'$  IS  $U_j$ )

Mit den unscharfen Mengen:

$A'$  : Eingangsvariable,

$A_i$  : linguistisch bezeichneter "Sollwert" der Eingangsvariablen zur Anwendung der Regel,

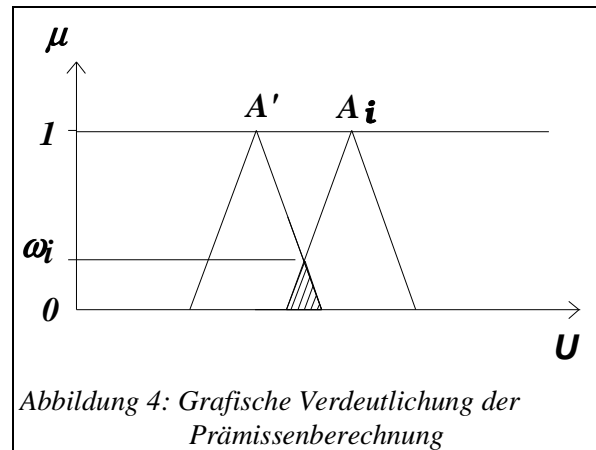
$U_i'$ : Ausgangsvariablen (Stellgröße)  
 $U_i$ : linguistisch bezeichneter "Sollwert" der Ausgangsvariablen,

Die Steuerregel oder bedingte Wertzuweisung wird in der Literatur auch als Fuzzy-Implikation oder auch verallgemeinerter "Modus Ponens" bezeichnet:

IF ( $A'$  IS  $A_i$ ) THEN ( $U_i'$  IS  $U_i$ ) entspricht ( $A'$  IS  $A_i$ )  $\Rightarrow$  ( $U_i'$  IS  $U_i$ ), wobei  $\Rightarrow$  die Implikation anzeigt, oder:

Prämisse: A ist wahr  
 Implikation: If A then B

Konklusion: B ist wahr



In der Prämisse ( $A'$  is  $A_i$ ) der Steuerregel werden zwei unscharfen Mengen auf ihre fuzzy Ähnlichkeit oder fuzzy Gleichheit [7, 9, 10] untersucht. Dazu wird zunächst die Schnittmenge  $S_i = A' \cap A_i$  der beiden unscharfen Mengen  $A'$  und  $A_i$  berechnet. Als Maß für die Ähnlichkeit der beiden unscharfen Mengen wird der größte Wert der Schnittmenge berechnet:

$$\omega_i := (A' \text{ IS } A_i) = \max\{S_i(x) \mid x \in S_i = A' \cap A_i\}, \quad \omega_i \in [0, 1], \quad (\text{siehe auch Abbildung 4})$$

Der Maximumoperator bestimmt das Element mit dem größten Zugehörigkeitswert in der unscharfen Menge  $S_i$  (Höhe von  $S_i$ ). Bei einem unendlichen Universum wird das Supremum von  $S_i$  berechnet. Das Gewicht  $\omega_i$  ist somit ein Maß für die Erfüllung der Teil-Prämisse und kann als Wahrheitswert interpretiert werden. Bei technischen Problemen ist der Eingangswert  $a'$  meist ein diskreter Zahlenwert. Dieser wird in eine unscharfe Menge  $A'$  umgewandelt, wobei die Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{A'}$  an der Stelle  $a'$  den Wert 1, ansonsten 0 ist (Abbildung 2c). Der Wahrheitswert oder Erfüllungsgrad der Teilprämisse kann in diesem Fall rechenstechnisch berechnet werden durch einfaches Einsetzen des Eingangswertes  $a'$  die Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{A'}$  ( $\omega_i = \mu_{A'}(a')$ )

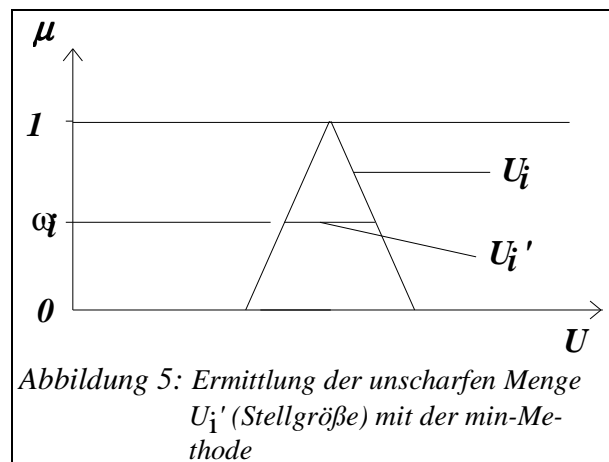
Bei der eigentlichen Inferenzstrategie hat man sehr vielfältige Möglichkeiten. In den meisten Anwendungen haben sich im wesentlichen zwei Verfahren durchgesetzt [12]:

### 1) Die min-Methode

Bei der min-Methode wird die linguistisch bezeichnete unscharf Ausgangsmenge  $U_i$  (Sollstellgröße beispielsweise "klein") der Ausgangsvariablen  $U_i'$  durch den Wahrheitswert  $\omega_i$  beschränkt bzw. begrenzt. Es gilt folgende Definition:

$$\text{THEN } (U_i' \text{ IS } U_i) \Leftrightarrow U_i' := \{\min(\omega_i, U_i) \mid \forall u \in U, i=1..n\}$$

Offensichtlich ist der Wert der Variablen  $U_i'$  wieder eine unscharfe Menge (siehe Abbildung 5).

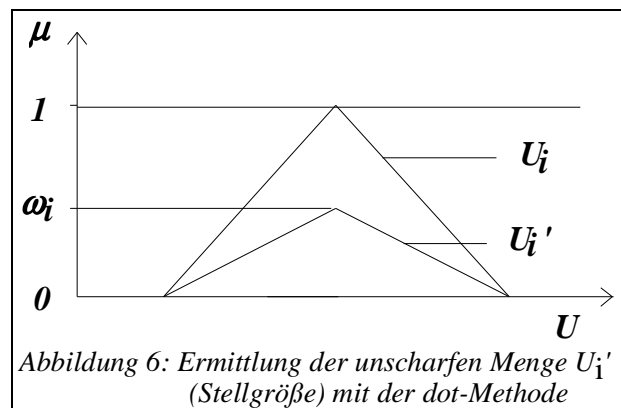


## 2) Die dot-Methode

Bei der dot-Methode (auch als "Produkt-Methode" bezeichnet) wird die der Wert der Ausgangsvariablen  $U_i'$  berechnet durch die Skalierung aller Werte von  $U_i$  mit dem Wahrheitswert  $\omega_i$  (siehe Abbildung 6). Es gilt:

$$THEN (U_i' IS U_i) \Leftrightarrow U_i' := \{\omega_i * U_i / \forall U \in U\}$$

Auch hier ist der Wert der Variablen  $U_i'$  wieder eine unscharfe Menge.



## 1.5. Die "compositional rule of inference"

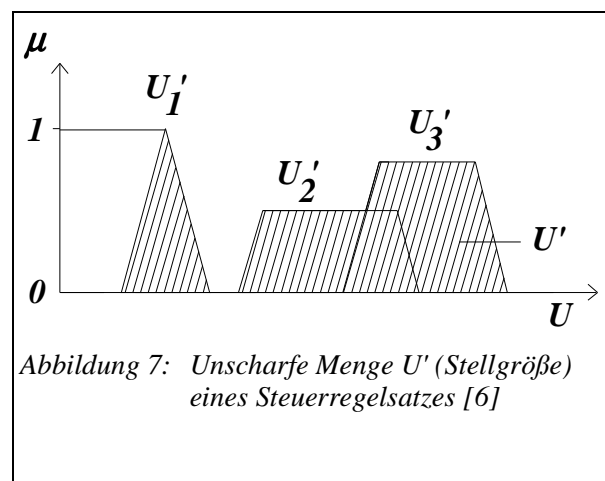
Die Regelbasis eines unscharfen Reglers besteht aus einem Satz von  $n$  Steuerregeln. Die unscharfen Ausgangsmengen jeder einzelnen Regel müssen daher wieder zu einer unscharfen Ausgangsmenge zusammengefaßt werden. Dies geschieht durch die sogenannte "compositional rule of inference". Für den bisherigen unscharfen Regler mit einer Ein- und einer Ausgangsgröße erhält man folgendes Steuerregelsystem:

IF ( $A'$  IS  $A_1$ ) THEN ( $U_1'$  IS  $U_1$ )  
 IF ( $A'$  IS  $A_2$ ) THEN ( $U_2'$  IS  $U_2$ )  
 .  
 .  
 IF ( $A'$  IS  $A_n$ ) THEN ( $U_n'$  IS  $U_n$ )

Den Wert der Ausgangsvariablen  $U'$  erhält man durch Vereinigung (siehe 1.3. und Abbildung 7) der unscharfen Mengen  $U_i'$  aller Steuerregeln ( $i=1..n$ ):

$$U' := \bigcup_{i=1}^n U_i'$$

Da die einzelnen Konklusionen entsprechend der Erfüllung der Prämissen gewichtet werden, besitzt die Regel, deren Prämisse am besten erfüllt ist, auch den größten Einfluß bei der Berechnung der Ausgangsvariablen  $U'$  des gesamten Systems, wenn der Wissensingenieur während der Wissensakquisition den Einfluß der Partialstellgrößen auf die Stellgröße durch gleich große Flächen modelliert. Das Modellieren über Flächengrößen ist für den Menschen sehr einfach, so daß ein erster Entwurf schnell durchgeführt werden kann. Die Optimierung des Entwurfs erweist sich allerdings als deutlich schwieriger, da diese Modellierungsweise sehr viel Intuition enthält. Die Freiheitsgrade bei der Modellierung bestehen bisher bei der Definition der unscharfen Mengen, den unscharfen Mengenoperationen (Abschnitt 1.3.), den unscharfen Regeln und



der Inferenzstrategie (Abbildung 5, 6). Allerdings muß bei der Verwendung anderer Mengenoperationen darauf geachtet werden welche Eigenschaften (Kommutativität, Distributivität) und Gesetze (De Morgan) erhalten bleiben.

## 1.6. Die Steuerregel bei beliebiger Anzahl von Ein- und Ausgangsvariablen (Multivariablensystem)

Es soll nun die Steuerregelstruktur für einen unscharfen Regler mit  $n$  Regeln,  $m$  Ein- und  $l$  Ausgangsvariablen behandelt werden. In diesem Fall hat eine Steuerregel die folgende Form :

IF <sub>$i$</sub>  ( $A'_{i1}$  IS  $A_{i1}$ ) and ... and ( $A'_{im}$  IS  $A_{im}$ ) THEN ( $U'_{i1}$  IS  $U_{i1}$ ) and\* ... and\* ( $U'_{il}$  IS  $U_{il}$ ),  $i = 1..n$ .

mit den unscharfe Mengen:

$A'_j$ : EingangsvARIABLEN  $j = 1..m$

$A_{ij}$ : linguistisch bezeichnete "Sollwerte" der EingangsvARIABLEN zur Anwendung der Regel  $i$

$U'_{ik}$ : AusgangsvARIABLEN,  $k = 1..l$ .

$U_{ik}$ : linguistisch bezeichnete "Sollwerte" der AusgangsvARIABLEN.

Die AusgangsvARIABLEN ( $U'_k$ ,  $k=1..l$ ) erhält man analog zu Abschnitt 1.5. durch Vereinigung der unscharfen Mengen  $U'_{ik}$  aller Steuerregeln ( $i=1..n$ ):

$$U'_k := \bigcup_{i=1}^n U'_{ik}$$

In den Teilprämissen der Regeln treten nun Junktoren (and) auf. An dieser Stelle kommt nun die unscharfe Logik<sup>6</sup> zum tragen. Sie ist eine Verallgemeinerung der mehrwertigen Logik [7]. In der unscharfen Logik dient eine Formel Sprache zur syntaktischen Formulierung von unscharfen Prädikaten über einem abzählbar unendlichen Alphabet. Die Formel Sprache  $L$  für die gesamte Prämisse einer unscharfen Regel kann induktiv aufgebaut werden, wobei  $t(s) \in [0,1]$  den Wahrheitswert einer Regel bezeichnet und die Konjunktion und Disjunktion genauso wie in der mehrwertigen Logik [11] interpretiert werden:

(1)  $t(s) = t(a)$  , falls  $s = a$  und  $a = (A'_i$  IS  $A_{ij}) \in [0,1]$  eine atomare Formel.

(2)  $t(s) = 1 - t(r)$ , falls  $s = \neg r$ .

(3)  $t(s) = \text{Min}[t(s_1), t(s_2)]$ , falls  $s = s_1$  and  $s_2$ .

(4)  $t(s) = \text{Max}[t(s_1), t(s_2)]$ , falls  $s = s_1$  or  $s_2$ .

(5)  $t(s) = t(b(x_1)$  and ... and  $b(x_n))$ , falls es eine Belegung  $x=x_1, \dots, x_n$  gibt für die  $b(x_i)$  definiert ist.

(6)  $t(s) = t(b(x_1)$  or ... or  $b(x_n))$ , falls es eine Belegung  $x=x_1, \dots, x_n$  gibt für die  $b(x_i)$  definiert ist.

---

<sup>6</sup>engl. fuzzy logic

Diese Definition läßt sich nutzen um die Erfüllung einer unscharfen Regel bei einer Belegung der linguistischen Variablen zu beschreiben. Eine unscharfe Regel ist erfüllbar, falls es eine Belegung gibt für die  $t(s) = 1$ . Eine Regel ist unerfüllbar, falls für jede Variablenbelegung  $t(s)=0$  ist. Unerfüllbare Regeln werden zur Vereinfachung weggelassen. Eine Menge  $Z$  mit mindestens 2 unterscheidbaren Elementen und den oben definierten Verknüpfungen  $\text{and}$ ,  $\text{or}$  und  $\neg$  bildet eine sogenannte unscharfe Algebra<sup>7</sup>, d.h. es gilt das Kommutativitäts, Assoziativitäts, Distributivgesetz u.s.w.. Analog zu den unscharfen Mengen ist die binäre Logik in der unscharfen Logik enthalten. Die unscharfe Logik ist keine Teilmenge der binären Logik, denn es gilt nicht allgemein  $(s \text{ and } \neg s) = 0$  und  $(s \text{ or } \neg s) = 1$  sondern  $\text{Min}[t(s), t(\neg s)] \leq 0.5$  und  $\text{Max}[t(s), t(\neg s)] \geq 0.5$ . Die Erfüllbarkeit einer unscharfen Regel und darausfolgend die Normalität der verwendeten unscharfen Mengen ist Voraussetzung für einige Beweise über die Eigenschaften unscharfer Regelsysteme (Relationen [10]).

Für die bisher definierten Maximum- und Minimum- Operatoren bei den unscharfen Mengen und der unscharfen Logik läßt sich eine disjunktive Verknüpfung in der Prämisse einer Regel auf zwei Regeln abbilden (Compositional Rule of Inference), so daß nur konjunktive Verknüpfungen betrachtet werden müssen. Die Konjunktion "and\*" ist ein rein syntaktisches Verbindungsglied in der Aufzählung der (separat) zu berechnenden Werte der Ausgangsvariablen  $U_{ij}$ , die voneinander unabhängig sind. Von nun an gelte aus Gründen der Vereinfachung die Konvention, daß anstelle der Konjunktionen "and" und "and\*" einheitlich die Konjunktion "and" benutzt wird.

Die Definition der Prämissen, insbesondere die verwendeten Junktoren bieten einen weiteren Freiheitsgrad bei der Modellierung von Transfer- oder inversen Transferfunktionen mit unscharfen Regeln. Zimmerman [1] schlägt die Benutzung von sogenannten  $\gamma$ -Operatoren vor. Sie sollen besser die menschliche Konjunktion und Disjunktion modellieren, sind aber wesentlich berechnungsintensiver. Die Junktoren, die unscharfe Relationen in den Anwendungen verknüpfen, besitzen meistens die Eigenschaften sogenannter  $t(\text{riangular})$ -Normen bzw.  $t\text{-CO}$ -Normen [13]. Neben den oben angegebenen Minimum / Maximum Operatoren existieren noch weitere Operatoren, die die  $t$ -Normen erfüllen. Bei Zimmermann [1] sind einige Entscheidungskriterien für die Auswahl derartiger Verknüpfungen angegeben, bei Gupta/Qi [14] werden verschiedene Verknüpfungen anhand von Simulationsergebnissen bewertet.

## 1.7. Berechnung einer scharfen Ausgangsgröße aus einer unscharfen Ausgangsfunktion (Defuzzifizierung)

Bisher berechnet die Recheneinheit jeweils eine unscharfe Menge für jede Stellgröße. Zur Regelung realer Prozesse ist es allerdings notwendig die unscharfe Menge in eine diskrete (crisp) Stellgröße umzuwandeln (defuzzifizieren). Zur Auswahl eines diskreten Wertes  $u_{\text{opt}}$  aus einer unscharfen Menge  $U'$  sind verschiedene Verfahren gebräuchlich. Beispielsweise wählt man dasjenige  $u$ , das den größten Zugehörigkeitswert in  $U'$  besitzt [5,6,15] oder, wenn mehrere globale Maxima der Zugehörigkeitsfunktion  $U'$  auftreten, das  $u$ , das den Mittelwert aller zu den Maxima gehörigen Argumente bestimmt [5]. Die am häufigsten verwendete Methode ist allerdings das Schwerpunktverfahren ("center of gravity COG" oder "centroid") [12,16]:

$$u_{\text{opt}} = \frac{\int u * \mu_{U'}(u) du}{\int \mu_{U'}(u) du}$$

<sup>7</sup>engl. fuzzy algebra

Bei einfachen oder mehreren eng beieinander liegenden Maxima der Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_U(u_i)$  liefern alle genannten Verfahren ähnliche Resultate. Wesentliche Unterschiede treten bei der Behandlung einer stark zerklüfteten Topologie von  $\mu_U(u_i)$  auf. Solche Funktionsverläufe treten auf, wenn widersprüchliche Regeln implementiert wurden. Entsprechend der obigen Aufzählungsreihenfolge wird von den Verfahren eine zunehmende Informationsmenge verarbeitet. Somit sollte das COG-Verfahren in schwierigen Fällen eingesetzt werden, wo die Anwendung des ersten Verfahrens einen Informationsverlust bedeuten würde. Leider ist dies Verfahren auch am rechenintensivsten. Nutzt man allerdings die Freiheitsgrade des Verfahrens und definiert eine veränderte Mengenvereinigung, so lassen sich die Berechnungen von Fläche und Moment einer unscharfen Menge auslagern, so daß diese nicht zur Laufzeit berechnet werden müssen. Mit diesem von Togai [12] in der Hardware verwendeten Verfahren lassen sich dann auch P-Regler realisieren, was mit den anderen Verfahren nicht möglich ist [17] (siehe Abbildung 8).

$$V_k = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot M_{i,k}}{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot A_{i,k}}; \quad M_{i,k} = \sum_{j=0}^{255} \mu_i(j) \cdot j; \quad A_{i,k} = \sum_{j=0}^{255} \mu_i(j)$$

$V_k$  = k-ter Ausgangswert  $k=1..l$   
 $M_{i,k}$  = k-tes Moment der Ausgangszugehörigkeitsfunktion der i-ten Regel  
 $A_{i,k}$  = k-te Fläche der Ausgangszugehörigkeitsfunktion der i-ten Regel  
 $\omega_i$  = Wahrheitswert der i-ten Regel

Abbildung 8: Berechnung eines diskreten Ausgangswerts durch Vorgabe zweier Kennwerte für jede Ausgangszugehörigkeitsfunktion [12]

Anhand der Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_U(u)$ , die der unscharfen Menge U' zugeordnet ist, kann auf die Qualität der benutzten Steuerregeln geschlossen werden [6]. Es stellt sich natürlich die wichtige Frage, wie die Zugehörigkeitsfunktionen einer unscharfen Menge sowie die Regeln bestimmt werden können [18,13]. Leider gibt es hierfür kein geschlossenes, rechnergestütztes, systematisches Entwurfsverfahren. Bis heute bedient man sich hierbei in der industriellen Praxis der "trial-and-error"-Methode, unterstützt von methodischen Ansätzen zur Kontrollregelentwicklung. Die Regeln werden aufgestellt:

- basierend auf der Erfahrung eines Operators,
- basierend auf dem Wissen von Regelungstechnikern,
- durch Beobachtung eines aktiven Operators,
- durch Beobachtung des Prozesses.

Dies ist bei einfachen Problemen nicht zu zeitaufwendig, stellt aber eine Schranke bei der Behandlung komplexer Systeme dar. Es gibt allerdings bereits Ansätze zur Automatisierung dieser Aufgabe,

z.B. durch einen "lernenden" Fuzzy-Controller [2, 19]. Weitere Forschungen versuchen die Verknüpfung von neuronalen Netzen und unscharfen Reglern [20, 21, 22, 23, 24, 25]. In neuronale Netze und Fuzzy-Systemen wird das Übertragungsverhalten eines zu modellierenden Systems ohne genaue Kenntnis der mathematischen Beschreibung zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße approximiert. Die Umsetzung des impliziten Wissens eines neuronalen Netzes (synaptische Gewichte) in explizites Wissen eines Fuzzy-Systems (Regeln) ist hierbei von besonderem Interesse. Die neuronalen Netze "lernen" z.B. durch Beobachtung eines Operators seine Regelstrategie und generieren aus dem "gelernten Wissen" automatisch Zugehörigkeitsfunktionen und Regeln. Soll der Fuzzy-Controller optimiert werden, so dienen die unscharfen Regeln meist zur Vorstrukturierung des neuronalen Netzes (Feed-Forward Netze) [20, 22]. Eine andere Möglichkeit der Optimierung besteht in der Verwendung von genetischen Verfahren [24], um parametrisierte Zugehörigkeitsfunktionen entsprechend einer extern definierten Bewertungsfunktion zu verändern. Shao hat einen selbstorganisierenden Fuzzy-Controller vorgestellt [26]. Er verwendet eine 2-Ebenen-Struktur, wobei die Grundebene von einem konventionellen Fuzzy-Controller gebildet wird. Die selbstorganisierende Ebene berechnet mit Hilfe eines Güteindex Änderungen der Steuerregeln in der Grundebene. Durch diese Form der "künstlichen Intelligenz" können adaptive Regler sowie auch effizientere Regelungen von nichtlinearen Prozessen mit Zeitverzögerung realisiert werden.

## **1.8. Zusammenfassendes Beispiel**

Zusammenfassend wird deutlich, daß der unscharfe Regler aufgrund seiner Korrespondenz mit der menschlichen Beschreibung und Verarbeitungsweise ein einfaches, leicht verständliches und flexibles Modellierungsverfahren darstellt. Bezüglich seiner Ein- und Ausgänge (Black-Box-Modell) stellt er eine nichtlineare Funktion dar. Für die Realisierung einer beliebigen nichtlinearen Funktion existieren vielfältige Verfahren. Für eine geringe Anzahl von Eingängen läßt sie sich durch einen Speicher realisieren bzw. durch ein Kennlinienfeld approximieren, denn in technischen Systemen kann man von einer diskreten Auflösung (beispielweise 8 BIT) ausgehen. Dies ist ebenfalls ein Ansatz, um die Stabilität des unscharfen Reglers nachzuweisen [5, 27]. Flexibler aber langsamer ist die Realisierung auf bereits existierenden Mikroprozessoren und Mikrocontrollern [28]. Höhere Verarbeitungsgeschwindigkeiten erfordern dagegen spezielle Hardware (Fuzzy-ASICs) [16, 29, 30, 31, 32, 33].

Zur grafischen Verdeutlichung des Ablaufs der bisher dargestellten Regelauswertung ist in Abbildung 9 ein zusammenfassendes Beispiel für einen unscharfen Regler mit zwei Ein- und zwei Ausgangsgrößen gegeben [34], wobei der Steueralgorithmus auf drei Steuerregeln beruht:

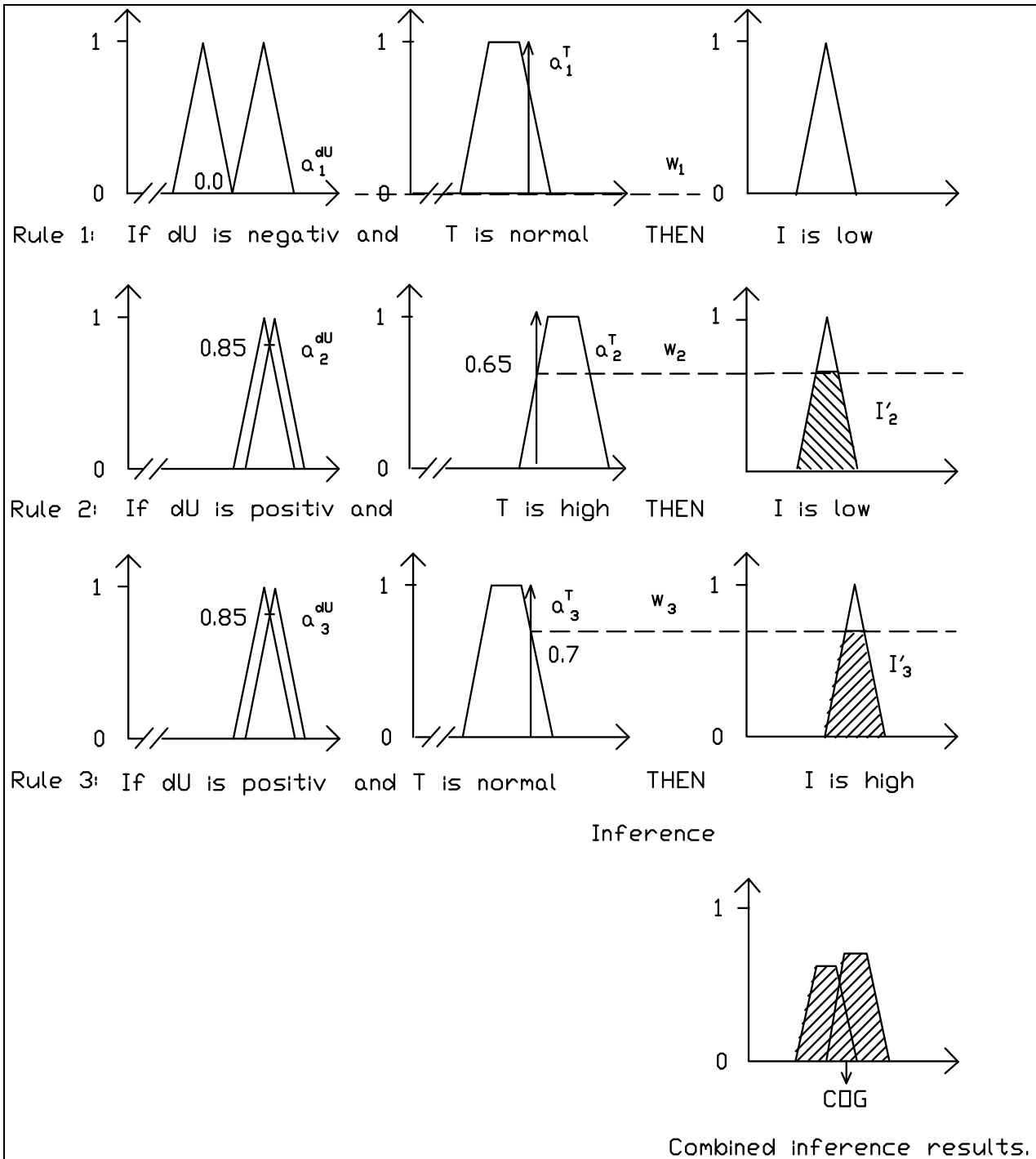


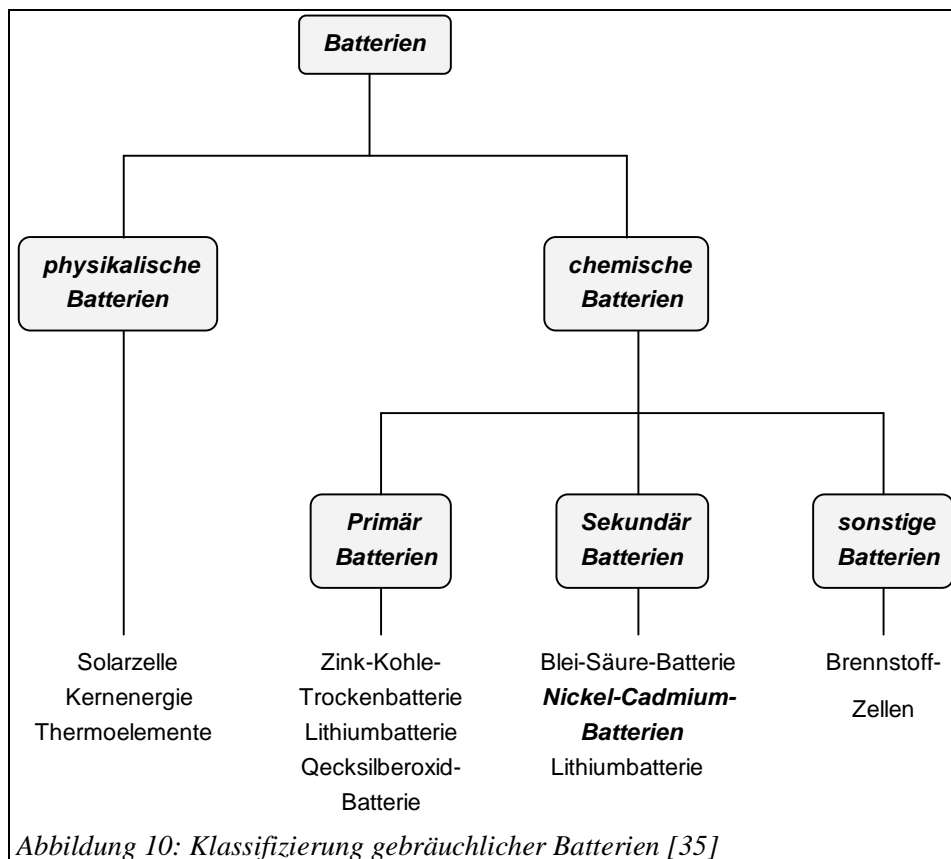
Abbildung 9: Verdeutlichendes Beispiel zur Steuerregelauswertung



## 2. GRUNDLAGEN DER NICKEL-CADMIUM-AKKUMULATOREN

### 2.1. Klassifizierung und Vergleich gebräuchlicher Batterien

Batterien dienen zur Speicherung und Umwandlung von Energie. Hierbei werden je nach Batterietyp chemische oder physikalische Vorgänge ausgenutzt. Den Hauptanteil der chemischen Batterien bilden die primären und sekundären Batterien. Bei den primären Batterien findet eine irreversible Umwandlung von Energie statt. Die aktiven Materialien sind nach der Entladung verbraucht und die Batterie unbrauchbar geworden. Bei den Sekundärbatterien ist eine Regenerierung der aktiven Materialien durch Zuführung elektrischer Ladung möglich. Diese Batterien werden auch als Akkumulatoren (Sammler) oder kurz "Akkus" bezeichnet. Heutzutage existiert eine Vielzahl von Batterietypen mit unterschiedlichen Eigenschaften und Anwendungsbereichen. In Abbildung 10 ist die Klassifizierung der Batterien nach ihrer physikalischen und chemischen Funktionsweise dargestellt.



Akkumulatoren

Die Tabelle 1 zeigt die Energiedichte einiger gebräuchlicher Batterietypen. Der linke Teil der Tabelle gibt die Energiedichte der gebräuchlichsten Batterien in Wattstunden pro Kilogramm an und im rechten Teil wird die Einheit Wattstunden pro Liter verwendet.

*Tabelle 1: Energiedichte gebräuchlicher Batterien [35]*

Wie aus Tabelle 1 abzulesen ist, liegt die Energiedichte der Sekundärbatterien im allgemeinen niedriger als die Energiedichte der Primärbatterien. Die hohe Lebensdauer der meisten Akkumulatoren gleicht diesen Nachteil aus. In Tabelle 2 werden die wichtigsten Eigenschaften der gebräuchlichsten Batterien gegenübergestellt. Hier fallen insbesondere die NiCd-Akkus durch ihre sehr hohe Lebensdauer in Verbindung mit der Fähigkeit zur Hochstromentladung auf.

## **2.2. Aufbau der NiCd-Zellen**

NiCd-Zellen unterscheiden sich in ihrem Aufbau je nach Anwendungszweck. Es gibt Zellen für Schnellladung, Hochstromentladung, extreme Temperaturbereiche oder andere spezielle Eigenschaften. Weitere variable Größen sind zum Beispiel die Kapazität oder die Lebensdauer der Zellen.

Category	Battery	Composition			Rated Voltage	Self discharger Rate at R. T. (%)	Discharge Characteristics				Service Life		
		Active Material of positive Electrode	Electrolyte	Active Material of negative Electrode			High-rate Discharge	Voltage Stability	Thermal Temperatuer				
									Low Temp.	High Temp.			
Primary Batteries	Carbon-zinc Dry Cell	MnO <sub>2</sub>	NH <sub>4</sub> Cl/ZnCl <sub>2</sub>	Zn	1.5	10/year	B	C	C	C	-		
	Mercury Oxide Battery	HgO	KOH (ZnO)	Zn	1.3	5/year	<sup>c</sup> (intermittent) B-C	AA	<sup>c</sup> Low Temp. Model available	AA	-		
	Alkaline-Manganese Battery	MnO <sub>2</sub>	KOH (ZnO)	Zn	1.5	7/year	B	B-C	A	A	-		
	Alkaline-Manganese Battery	Ag <sub>2</sub> O	KOH or NaOH (ZnO)	Zn	1.5	10/year	B	AA	A	A	-		
	Silver Oxide Battery	AgCl	Sea Water	Mg	1.4	Storable for 3-5 years	AA	AA	AA	A	-		
	Zinc air Cell	Air (activated charcoal)	KOH (ZnO) or NH <sub>4</sub> Cl	Zn	1.3	-	C	A	B	C	Negative Z Electrolyte Replaceable		
	Lithium Battery	MnO <sub>2</sub>	Propylene carbonate and other organic solvent	Li	3.0	0.5-1/year	A-B	A	A	A	-		
	(CF)n	LiBF <sub>4</sub> + butyrolactone	Li	3.0	0.5-1/year	B	A	A	A	-			
	CuO	Propylene carbonate and other organic solvent	Li	1.5	0.5-1/year	B	A	A	A	-			
Secondary Batteries	Lead Acid Battery	Vented	PbO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Pb	2.0	20/month	B	A-B	C	A	100-400	
		Sealed	PbO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Pb	2.0	3/month	B	A-B	A	A	200-500	
	Alkaline Battery	Nickel-Iron Battery	Nicel-Iron	NiOOH	KOH	Fe	1.2	20/month	B	A	C	A	100-2000
			Junger	NiOOH	KOH	Cd	1.2	30/year	B	A	A	A	500-5000
		Nickel Cadmium Battery	Sintered	NiOOH	KOH	Cd	1.2	30/year	AA	A	A	A	500-5000
			Sealed	NiOOH	KOH	Cd	1.2	25/month	AA	A	A	A	300-2000
			Silver Oxide Zinc	AgO	KOH (ZnO)	Zn	1.5	20/month	AA	<sup>2</sup> level Portions	A	A	10-400
			Silver Oxide Cadmium	AgO	KOH	cd	1.1	25/year	B	<sup>2</sup> level Portions	A	A	300-2000
Carbon Lithium	C	Propylene carbonate and other organic solvent	Li	3.0	5/year	C	C	B	A	2000-10000			

Tabelle 2: Vergleich gebräuchlicher Batterien [35]

Ein wichtiges Merkmal einer Akkuzelle bildet der Grad ihrer Dichtheit. Hier unterscheidet man drei gebräuchliche Bauformen:

- Die **geschlossene Zelle** hat einen dichtschießenden Zellendeckel mit einer oder mehreren Öffnungen, durch die entstehendes Gas entweichen oder Nachfüllwasser eingefüllt werden kann. Die Öffnungen sind durch geeignete Verschlussstopfen geschlossen [36].
- Die **verschlossene Zelle** oder **gasdichte Zelle** ist während der Dauer ihrer Brauchbarkeit wartungsfrei und kann lageunabhängig betrieben werden. Entstehender Gasdruck kann über ein wieder schließendes Zellenventil abgebaut werden [36].

Für diese Arbeit sind lediglich gasdichte Zellen von Bedeutung, da Zellen dieser Bauform für den Einsatz in Elektrowerkzeugen geeignet sind. Daher beziehen sich alle folgenden Aussagen ausschließlich auf gasdichte Akkumulatoren.

Das zweite wesentliche Merkmal einer gasdichten NiCd-Zelle ist die Ausführung der Elektroden. Entsprechend der Elektrodenausbildung unterscheidet man zwei Zellentypen:

- **Zellen mit Sinterelektroden (Sinterzellen),**
- **Zellen mit Masseelektroden ('pressed-plate' Zellen).**

Bei den 'pressed-plate' Zellen bildet man die Elektroden direkt aus den chemisch aktiven Substanzen. Sie werden unter Beimengung von Graphit oder Nickelpulver zur Erhöhung der Leitfähigkeit in die gewünschte Form gepreßt. Diese Technik wendet man in der Regel zur Herstellung von Knopfzellen an.

Am gebräuchlichsten sind Zellen mit zylindrischer Bauform. Das Gehäuse besteht meistens aus einem Stahlbecher, der mit einem Deckel dicht verschlossen ist. Abbildung 11 zeigt eine Akkuzelle in zylindrischer Bauform. Die Elektroden bestehen aus dünnen, perforierten und vernickelten Stahlfo-

Akkumulatoren

lien, auf die Nickelpulver bei einer Temperatur von 1000°C aufgesintert wird. Dadurch erhält man eine sehr große Oberfläche, was eine gute Stromleitung und große Kapazität garantiert. Auf die derart behandelten Elektroden werden nun die aktiven Substanzen Nickelhydroxid für die Anode und Cadmiumhydroxid für die Kathode aufgebracht. Die fertigen Elektroden besitzen eine Gesamtdicke von 0.5 bis 1 mm.

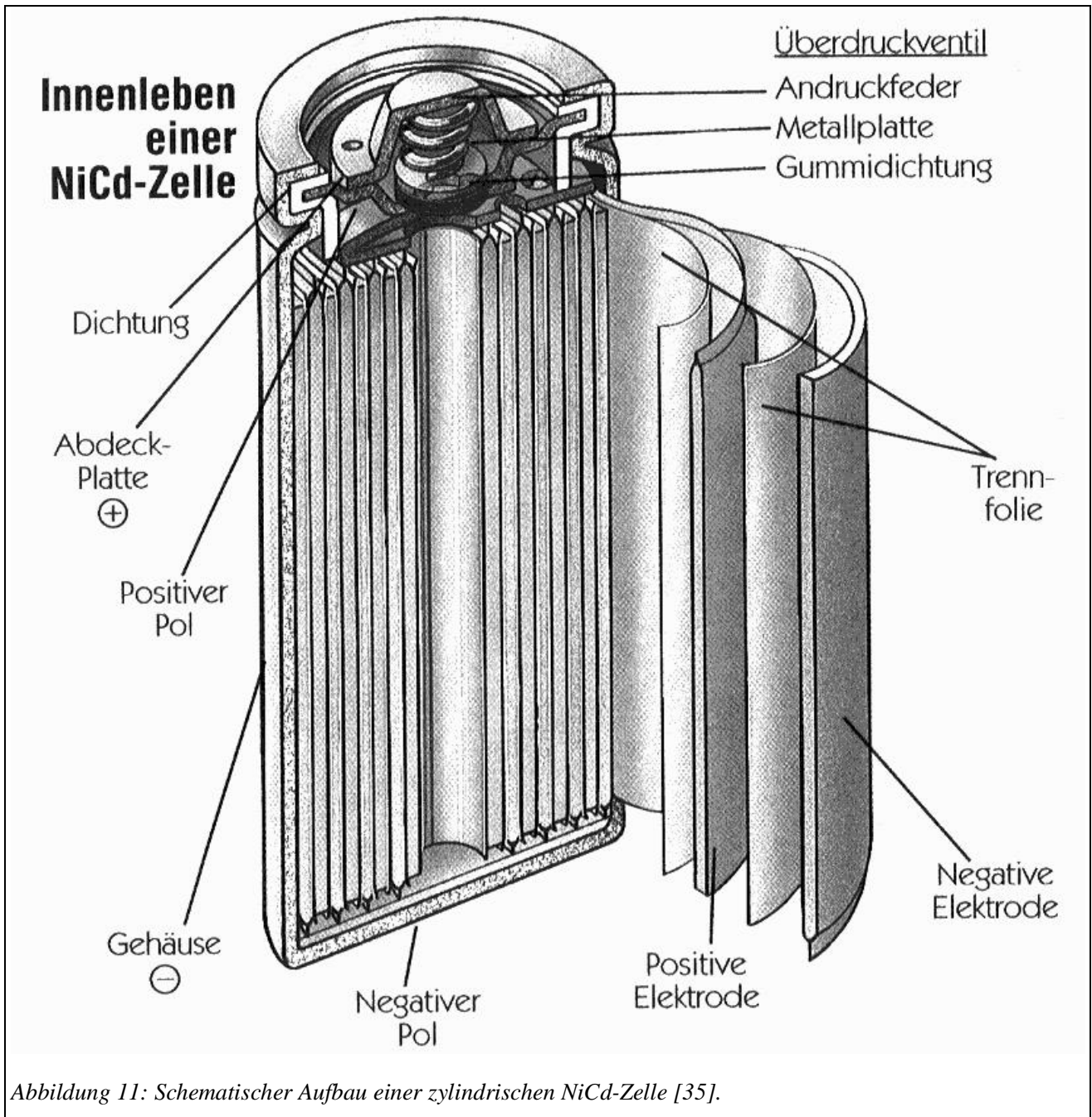


Abbildung 11: Schematischer Aufbau einer zylindrischen NiCd-Zelle [35].

Die Elektroden sind im Inneren der Zelle aufgerollt und durch einen Separator voneinander getrennt. Kathodenseitig werden die Elektroden mit dem Stahlbecher und anodenseitig mit dem Deckel verschweißt. Die Art der Verschweißung und die Anzahl der Schweißpunkte hat großen Einfluß auf den Innenwiderstand und die Strombelastbarkeit der Zelle.

Eine entscheidende Rolle spielt auch die Wahl des richtigen Separators, denn er hat unter anderem Einfluß auf folgende Eigenschaften der Zelle:

- **Spannungslage bei Hochstromentladung**
- **Lebensdauer der Zelle (vor allem bei erhöhter Temperatur)**
- **Überladefestigkeit**
- **Widerstandsfähigkeit bei mechanischer Beanspruchung**
- **Selbstentladung**

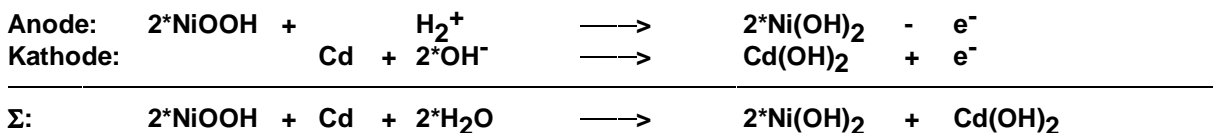
Das Separatormaterial sollte unter anderem hohe mechanische Festigkeit bei großer Flexibilität aufweisen und thermisch hoch belastbar sein. Es muß gasdurchlässig sein, einen hohen elektrischen Widerstand besitzen, aber dennoch den Ionenstrom möglichst wenig behindern. Zusätzlich soll der Separator noch möglichst viel Elektrolyt aufnehmen können. Betrachtet man all diese erwünschten Eigenschaften, so wird klar, daß nur Kompromißlösungen möglich sind, da nicht alle Eigenschaften gleichermaßen optimal erfüllt werden können. So erklärt sich auch die Vielzahl anwendungsspezifischer Akku-Typen. Häufig verwendete Separatormaterialien sind Vliese aus Polyamid- oder Polypropylen-Fasern [36].

### 2.3. Funktionsweise der NiCd-Akkumulatoren

Wie der Name schon sagt, besitzen NiCd-Akkus eine positive Elektrode aus Nickeloxihydroxid (NiOOH) und eine negative Elektrode aus Cadmium (Cd). Als Elektrolyt dient eine wässrige Lösung aus Kaliumhydroxid (KOH), welche auch unter dem Namen Kalilauge bekannt ist. Beteiligt an den auftretenden chemischen Reaktionen sind neben den Elektrodenmaterialien Nickeloxihydroxid und Cadmium nur noch das im Elektrolyt enthaltene Wasser (H<sub>2</sub>O). Das Elektrolyt Kalilauge hat lediglich die Aufgabe, den Ionenstrom zwischen den Elektroden zu leiten. Die im Zelleninnern ablaufenden chemischen Vorgänge sind teilweise sehr komplex und werden in dieser Arbeit daher ein wenig vereinfacht dargestellt.

#### 2.3.1. Entladung

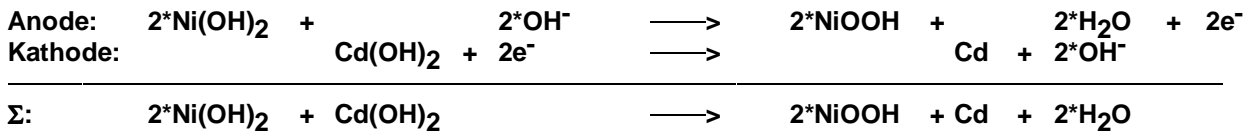
Bei der Entladung des Akkus werden seine Elektroden unter der Freisetzung von elektrischer Energie in einen höheren Oxidationszustand gebracht. Dabei wandelt sich das Nickeloxihydroxid in Nickelhydroxid und das Cadmium in Cadmiumhydroxid um. Bei dieser Reaktion wird auch ein Teil des Wassers im Elektrolyt umgewandelt. Die chemischen Gleichungen lauten wie folgt [36]:



#### 2.3.2. Ladung

Bei der Aufladung eines entladenen Akkus wird dieser Vorgang umgekehrt und durch Zufuhr von elektrischer Energie das Elektrodenmaterial reduziert. Es geschieht hierbei folgendes:

Akkumulatoren



Es ist zu erkennen, daß sich durch Zuführung von zwei Elektronen an der Kathode das Cadmiumhydroxid zu Cadmium reduziert. Dabei entstehen zwei Hydroxid-Ionen (OH<sup>-</sup>), welche zum Pluspol wandern und dort das Nickelhydroxid reduzieren. Hierbei entsteht Wasser und zwei freie Elektronen, die vom Ladegerät abgesaugt werden. Bei der Entladung verbraucht sich dieses Wasser wieder. Die Reaktion an der negativen Elektrode verläuft exotherm; es wird also Wärme freigesetzt, und die Reaktion an der positiven Elektrode verläuft endotherm, sie verbraucht also Wärme. Bei einem normalen Ladevorgang ist die Wärmebilanz in etwa ausgeglichen mit einem leichten Übergewicht der endothermen Reaktion, so daß der Akku beim Ladevorgang sogar abkühlen kann.

Die Reaktionsgleichungen verdeutlichen, daß das Kaliumhydroxid nicht an den chemischen Reaktionen beteiligt ist und somit die Zusammensetzung des Elektrolytes nahezu unabhängig vom Ladezustand des Akkus ist. Lediglich die Wasserkonzentration verändert sich abhängig vom Ladezustand. Die Konstanz der elektrischen Eigenschaften des Elektrolytes bewirkt einen nahezu konstanten inneren Widerstand des NiCd-Akkus, der zudem noch sehr niedrig ist. Dies hat eine weitgehend konstante Akku-Spannung über fast den gesamten Arbeitsbereich des Akkus zur Folge [36].

Die Reaktionsgleichungen für den Lade- und Entladevorgang lassen sich in einer Gleichung zusammenfassen (siehe Abbildung 12). Man sieht, daß weder das Elektrolyt noch die Elektroden beim Laden oder Entladen dauerhafte physikalische Veränderungen erfahren. Auf diesem sehr positiven Effekt beruht die große Lebensdauer der NiCd-Akkus [36].

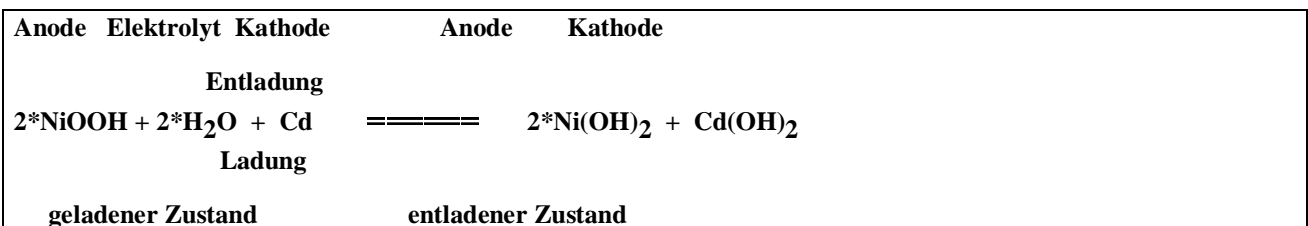
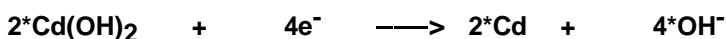


Abbildung 12: Reaktionsgleichung NiCd-Akku [36].

2.3.3. Überladung

NiCd-Akkus sind so konstruiert, daß die negative Elektrode gegenüber der positiven überdimensioniert ist. An der Cadmium-Elektrode werden also weiterhin (OH<sup>-</sup>)-Ionen mit der bereits bekannten Reaktion generiert:



Diese (OH<sup>-</sup>)-Ionen wandern zum Pluspol, können dort aber nicht mehr mit der positiven Elektrode reagieren, da diese bereits vollständig in Nickeloxihydroxid umgewandelt ist. An dieser Stelle setzt jetzt ein andere chemische Reaktion ein, bei der Sauerstoff freigesetzt wird:



Da Cadmium sehr schnell mit Sauerstoff reagiert, kann der Sauerstoff an der negativen Elektrode nach folgender Gleichung rekombinieren:



Hält sich der Ladestrom in Grenzen, so liegt die Generationsrate der (OH<sup>-</sup>)-Ionen unter der Rekombinationsrate der Sauerstoffmoleküle. In diesem Fall tritt praktisch kein Sauerstoff im Zelleninnern auf. Sinkt die Rekombinationsrate des Sauerstoffs unter die Generationsrate der (OH<sup>-</sup>)-Ionen, so entsteht ein Überdruck in der Zelle. Der Sauerstoff bleibt der Zelle jedoch bis zu einem bestimmten Überdruck erhalten. Ist der kritische Überdruck erreicht, so öffnet sich ein Sicherheitsventil und es tritt auch bei gasdichten Zellen ein bleibender Kapazitätsverlust auf. In Folge des Überdrucks in der Zelle steigt auch die Zelltemperatur an. Ein starker Temperaturanstieg wird durch die exotherm verlaufende Reaktion an der Cadmium-Elektrode hervorgerufen, welche auch bei einer Überladung des Akkus weiterläuft, während hingegen die wärmeverbrauchende Reaktion an der positiven Elektrode bei Überladung verschwindet [35],[36],[37].

## 2.4. Eigenschaften der NiCd-Akkumulatoren

### 2.4.1. Innenwiderstand

Wie bereits erwähnt wurde, ist der Innenwiderstand der NiCd-Zellen aufgrund ihrer Bauart sehr gering und nahezu konstant über den gesamten Kapazitätsbereich. Lediglich gegen Ende der Entladung ist ein Ansteigen des Innenwiderstandes zu beobachten. Auch die Temperatur hat Einfluß auf den Innenwiderstand der Zellen. Bei Temperaturen unter Null Grad Celsius steigt der Widerstand der Zellen deutlich an. Abbildung 13 zeigt den Innenwiderstand zweier verschiedener Akku-Typen von SANYO in Abhängigkeit von der Kapazität und der Temperatur [35].

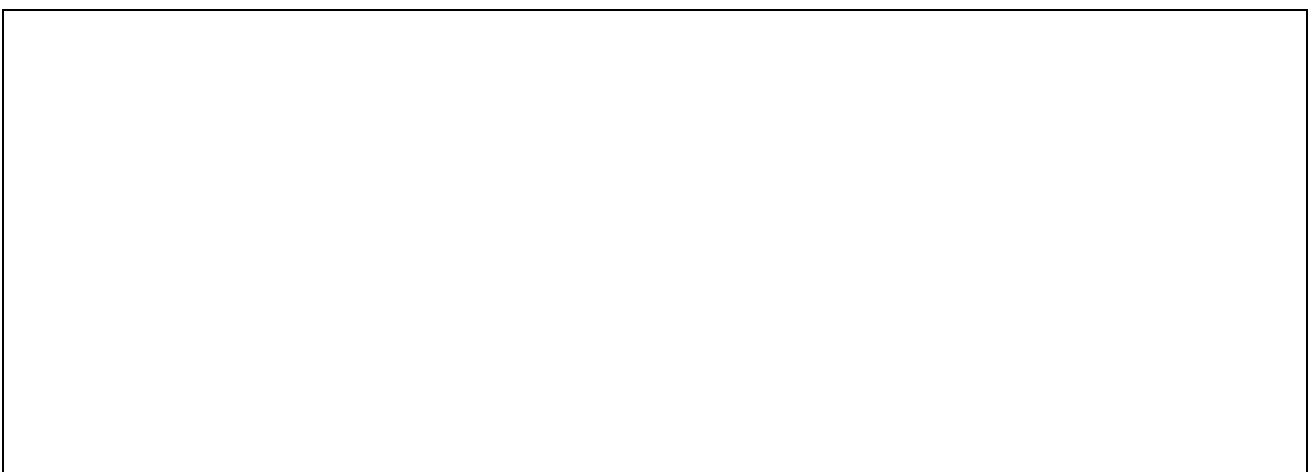


Abbildung 13: Innenwiderstand in Abhängigkeit von der Kapazität bzw. Temperatur [35].

Akkumulatoren

2.4.2. Ruhespannung

Die Ruhespannung einer NiCd-Zelle liegt je nach Ladezustand und Temperatur zwischen 1.3 V und 1.4 V. Sinkt die Ruhespannung unter 1.2 V ab, so ist der Akku mit Sicherheit entladen. Interessant ist, daß die Ruhespannung einen negativen Temperaturbeiwert aufweist, und zwar sinkt sie um zirka 4 mV pro Grad Celsius. Eine empirische Formel für die Ruhespannung lautet [36],[39]:

$$U_0 = 1.3 \text{ V} + 4 \text{ mV/}^\circ\text{C} * ( 25^\circ\text{C} - T )$$

2.4.3. Entladeschlußspannung

Die Entladeschlußspannung ist die Grenzspannung, die bei der Entladung einer Akkuzelle nicht unterschritten werden sollte, um Schäden an der Akkuzelle zu vermeiden. Sie liegt je nach Zellen-Typ bei 1.0 V bis 0.8 V. Spätestens bei Erreichen dieser Spannung, sollte der Akku außer Betrieb genommen werden und wieder aufgeladen werden. Die Entladeschlußspannung kann je nach Anwendung auch anders definiert werden, falls diese es zum Beispiel aus sicherheitstechnischen Gründen erfordert [35],[36].

2.4.4. Selbstentladung

In diesem Punkt sind die Sinterzellen wegen ihrer großen Elektrodenoberfläche stärker betroffen als die 'pressed plate' Zellen. Die Selbstentladung ist temperaturabhängig. Bei 40°C tritt schon nach einigen Wochen vollständiger Kapazitätsverlust auf, bei Temperaturen unter 0°C bleibt auch nach Monaten noch eine Kapazität von 80% bis 90% erhalten. Mit zunehmendem Alter der Zelle nimmt die Entladerate infolge der allmählichen Zersetzung des Separatormaterials zu.

2.4.5. Entnehmbare Kapazität

Die entnommene Kapazität läßt sich berechnen aus dem Entladestrom, integriert über die Entladezeit. Die Kapazität eines vollgeladenen Akkus ist abhängig von der Temperatur, der Entladestromstärke und von der Vorgeschichte des Akkus (siehe auch Abschnitt Gedächtniseffekt). Maximale Kapazität läßt sich ungefähr bei Temperaturen zwischen 20°C und 35°C erreichen [37].

2.4.6. Gedächtniseffekt

Der Gedächtniseffekt bewirkt ein Absinken der Kapazität bei unterforderten Akkus. Werden Akkus längere Zeit nur geladen ohne gelegentlich entladen zu werden, so steigt deren Innenwiderstand an, und diese Zellen sind nicht sofort in der Lage, große Ströme abzugeben. Ähnliche Vorgänge beobachtet man bei Zellen, die häufig nur teilweise entladen werden. Diese verhalten sich bis zum gewohnten Entladepunkt normal, beim Überschreiten dieser Schwelle bricht die Zellenspannung jedoch sehr schnell zusammen. Für dieses Phänomen gibt es eine sehr einfache Erklärung: Das Elektrodenmaterial neigt dazu, größere Kristalle zu bilden, welche chemisch weniger reaktionsfreudig sind. Die Möglichkeit der Bildung solcher Großkristalle besteht immer dann, wenn Teile des aktiven Elektrodenmaterials ungenutzt sind. Sie fallen dann aus dem Lade/Entlade-Zyklus heraus. Daher sollten NiCd-Akkus auch möglichst vollständig entladen werden, bevor sie wieder aufgeladen werden. Glücklicherweise läßt sich das 'Gedächtnis' der Akkus durch zwei bis drei vollständige Lade/Entlade-Zyklen wieder löschen [36],[38],[39].

### 2.4.7. Lebensdauer

NiCd-Akkus verlieren im Laufe der Zeit allmählich ihre Kapazität. Üblicherweise betrachtet man als Ende der Lebensdauer einen Kapazitätsrückgang auf 50% bis 60% der Nennkapazität. Die Lebensdauer der Akkus ist je nach Hersteller und Anwendungszweck unterschiedlich, sie liegt bei sachgemäßer Behandlung aber bei mehreren 100 Lade/Entlade-Zyklen. Die Firma SANYO gibt zum Beispiel für ihre NiCd-Akkus eine Lebensdauer von mindestens 500 Lade/Entlade-Zyklen an [35],[39].

## 2.5. Ladecharakteristik

Die wichtigsten Parameter einer gasdichten NiCd-Zelle während des Ladevorganges sind die Zellenspannung, der Innendruck der Zelle und ihre Temperatur. Theoretisch wäre die Überwachung des Zellendruckes bei der Aufladung eines Akkus am effektivsten, da der Zellendruck der unmittelbare Indikator für eine beginnende Sauerstoffproduktion ist. Die Sauerstoffproduktion bildet, wie im Abschnitt Überladung beschrieben, das Indiz für die einsetzende Überladung der Zelle. In der Praxis ist eine Überwachung des Zellendruckes jedoch unmöglich, da es sich nicht rentiert, jede Akkuzelle mit einer entsprechenden Druckmeßeinrichtung zu versehen. Daher werden in der Regel nur die Spannung und die Temperatur des Akkus überwacht. In der Praxis reicht die Beobachtung der Zelltemperatur aus, um auf den Zellendruck schließen zu können, da ein Ansteigen des Zellendruckes unmittelbar zu einem Anstieg der Temperatur führt. Allerdings muß hierbei eine gewisse Zeitverzögerung in Kauf genommen werden. Abbildung 14 zeigt sehr gut den prinzipiellen Zusammenhang zwischen Druckanstieg und Temperaturanstieg. Der Druckanstieg beginnt bei Überschreiten der Nennkapazität, während man einen meßbaren Anstieg der Temperatur erst verzögert beobachtet. Eine derartige Überladung ist bei gasdichten Akkuzellen durchaus akzeptabel.

Neben der Temperatur spielt auch die Zellenspannung bzw. die Zellenspannungsänderung eine wichtige Rolle bei der Ladekontrolle gasdichter Akkus. Abbildung 15 zeigt den prinzipiellen Verlauf der Zellenspannung während der Aufladephase für zwei verschiedene Ladeströme bei einer Zellentemperatur von 25°C.

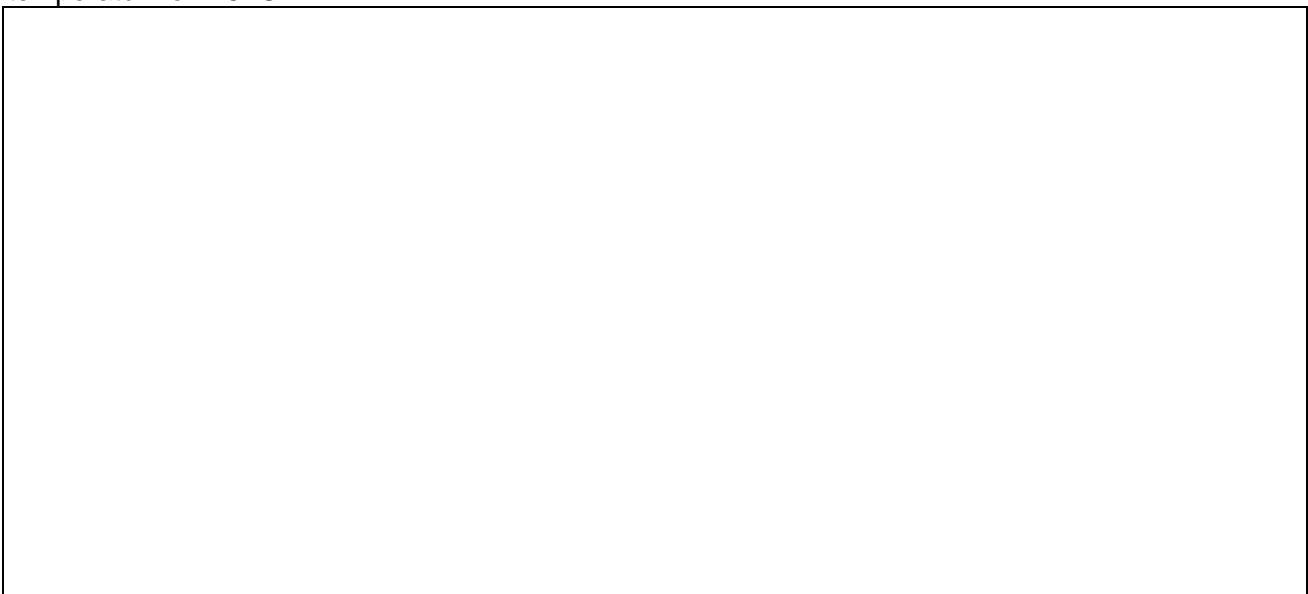


Abbildung 14: Druck- und Temperaturverlauf während des Ladevorganges [37].

Akkumulatoren

Zu Beginn des Aufladens steigt die Spannung relativ stark an, flacht dann aber bis zum Erreichen der Vollladung ab. Bei beginnender Überladung steigt die Spannung im normalen Temperaturbereich wieder stärker an, erreicht ein Maximum und fällt dann sogar wieder ab. Dieser prinzipielle Verlauf der Spannung tritt aber leider nicht in allen Temperaturbereichen auf und die Absolutwerte der Spannungen und die Steigung der Kurven sind zusätzlich noch von weiteren Randbedingungen abhängig. Eine wichtige von diesen Randbedingung ist die Größe der Ladestromstärke, wie sie in Abbildung 15 skizziert ist. Mit sinkender Ladestromstärke flacht die Spannungsüberhöhung am Ladeende ab. Sie kann sogar vollständig verschwinden. Weitere Faktoren, welche die Zellenspannung während des Ladevorganges bestimmen, sind die Temperatur, die Bauart der Zelle, das Lebensalter der Zelle, ihre Vorgeschichte, usw. [35],[37].



Abbildung 15: Verlauf der Zellenspannung während der Aufladung bei Ladeströmen von 0.12A und 2.4A bei 25°C. Punkt A: Spannung ( $U_A$ ) bei voller Aufladung, Punkt B: Spannungsmaximum ( $U_B$ ) [37]

2.5.1. Effizienz des Ladevorganges, Ladefaktor

Ein Ladevorgang ist umso effektiver, je mehr von der beim Laden in die Zelle hineingesteckten Energie auch tatsächlich zur Umwandlung der Elektroden in eine brauchbare, entladbare Form verwendet wird. Ein wichtiges Maß hierfür stellt der sogenannte Ladefaktor L dar. Er ergibt sich aus dem Quotient aus der beim Laden zugeführten Ladungsmenge und der beim Entladen entnehmbaren Ladungsmenge, also:

$$\text{Ladefaktor} = \frac{\text{Ladestrom} \cdot \text{Ladezeit}}{\text{Entladestrom} \cdot \text{Entladezeit}}$$

bei konstantem Strom bzw. durch:

$$L = \frac{\int I_{\text{Lade}} dt}{\int I_{\text{Entlade}} dt}$$

bei veränderlichem Strom. Der Ladefaktor ist immer größer als 1, üblicherweise werden Ladefaktoren von 1.4 bis 1.6 erreicht [37]. Ein gebräuchliches Maß ist auch die Ladeeffizienz E (engl.: "Charge Efficiency"). Sie wird aus dem Kehrwert des Ladefaktors gebildet und in Prozent angegeben [35].

$$E = \frac{\int I_{\text{Entlade}} dt}{\int I_{\text{Lade}} dt} \times 100 = \frac{1}{L} \times 100$$

## 2.6. Entladecharakteristik

Die Zellenspannung  $U$  bei der Entladung setzt sich zusammen aus der Leerlauf- oder Ruhespannung des Akkus  $U_0$  abzüglich des Spannungsabfalls am Innenwiderstand der Zelle  $I \cdot R_i$ . Für die Zellen- bzw. Klemmenspannung des Akkus gilt also:

$$U = U_0 - I \cdot R_i$$

Zu Beginn der Entladung sinkt die Akkuspannung zunächst ein wenig, nimmt dann aber über den größten Teil des Arbeitsbereiches einen recht konstanten Wert an. Erst wenn der Akku zu zirka 90% entladen ist, sinkt die Akkuspannung rapide ab. Abbildung 16 zeigt den Verlauf der Akkuspannung während der Entladung bei verschiedenen Stromstärken. Der Verlauf der Spannung bei der Entladung wird von den gleichen Randbedingungen beeinflusst wie bei der Aufladung (siehe Abschnitt Ladecharakteristik). Auf die Details der bei der Entladung auftretenden Effekte soll in dieser Arbeit nicht eingegangen werden, da sie für die Entwicklung des Ladegerätes nicht von Bedeutung sind [35].

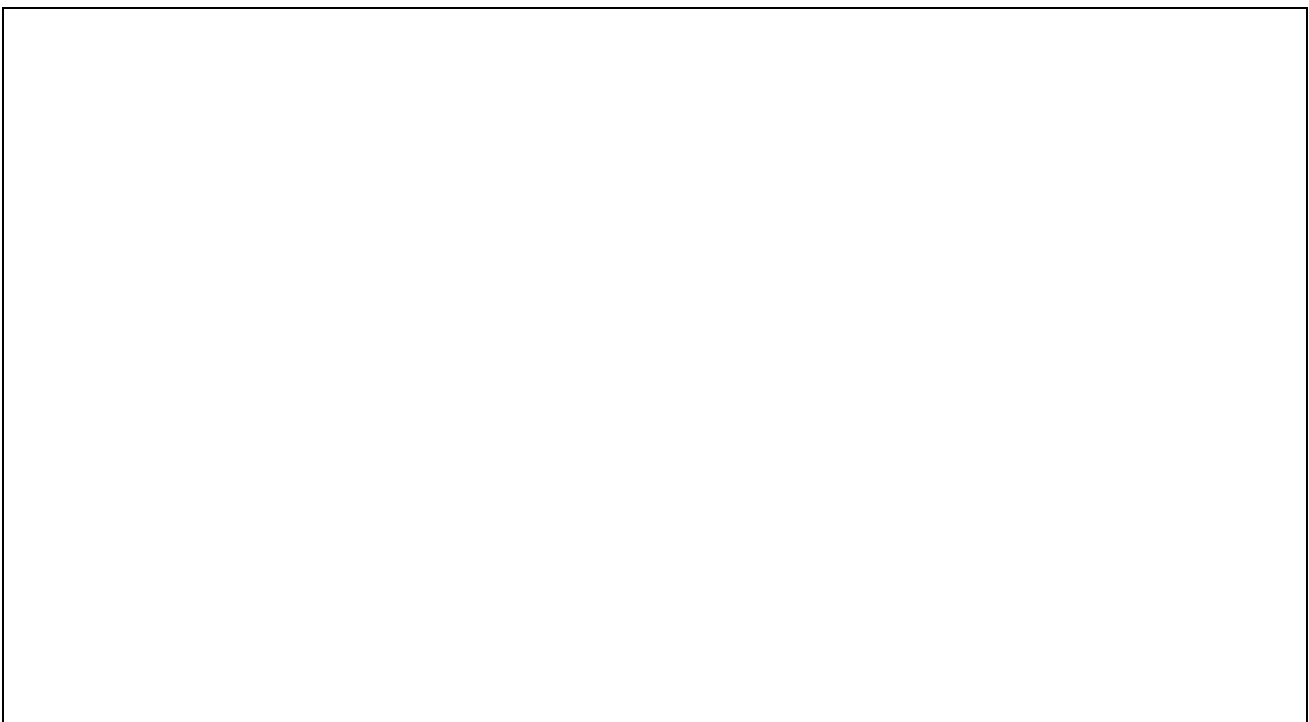


Abbildung 16: Spannung während des Entladevorganges bei verschiedenen Entladeströmen [35].



### **3. LADEVERFAHREN**

Beim Laden von Akkumulatoren spielt die sogenannte C-Rate eine wichtige Rolle. Sie setzt die Stromstärke ins Verhältnis zur Nennkapazität des Akkus. Soll ein Akku mit einer Nennkapazität von 1.5 Ah mit der C-Rate geladen werden, so muß ein Ladestrom von 1.5 A fließen. Wird ein solcher Akku mit 3 A geladen, so spricht man von einer 2-C-Laderate oder einfach von der 2-C-Ladung [35],[36]. Es sollen nun verschiedene Ladeverfahren vorgestellt werden. Kriterien für die Klassifizierung eines Ladeverfahrens sind unter anderem der Zeitbedarf, welcher unmittelbar mit der Laderate zusammenhängt, die Art der Stromregelung (z.B. konstant, gepulst, usw. ) und die Ladeende-Detektion.

#### **3.1. Klassifizierung nach Zeitbedarf**

##### 3.1.1. Erhaltungsladung

Dieses Verfahren ist eigentlich kein Ladeverfahren im Sinne der Aufladung von Akkumulatoren, sondern es deckt lediglich die Ladungsverluste, die durch Selbstentladung entstehen. Bei diesem Verfahren wird ein sehr geringer Ladestrom ständig zugeführt. Dieser liegt im Bereich von 1/20 bis 1/50 der Normalladung [36],[39].

##### 3.1.2. Normalladung

Als Normalladung bezeichnet man die Ladung eines Akkus mit 0.1 C. Bei einem Ladefaktor von 1.4 muß der Akku also 14 Stunden lang geladen werden, bis er seine volle Kapazität erreicht hat. Dieses Verfahren gilt als schonend [37] und eine Überladung mit Normalladestrom ist relativ unkritisch. Selbst eine Überladung von mehreren Tagen hat keine negativen Folgen. Nachteil dieses Verfahrens ist der große Zeitbedarf beim Laden, dafür spart man jedoch die aufwendige Überwachung und Stromregelung des Akkus [35],[36],[39].

##### 3.1.3. Beschleunigte Normalladung

Bei diesem Ladeverfahren werden die Akkus mit 0.2 - 0.3 C in 4 bis 8 Stunden vollgeladen. Dieses Verfahren eignet sich auch noch für Akkus, die nicht speziell für Schnellladung konstruiert sind [36].

##### 3.1.4. Schnellladung

Entsprechend der Definition der beschleunigten Normalladung wäre jede Ladeart mit Ladeströmen oberhalb von 0.3 C, als Schnellladung zu bezeichnen. Üblicherweise wird unter Schnellladung jedoch

das Aufladen der Akkus unterhalb einer Stunde verstanden. Hierbei sind Lade-Raten von 1 C bis 15 C gebräuchlich. Allerdings sind nur spezielle Akkus schnellladefähig. Die kurze Ladezeit ermöglicht eine mehrfach Verwendung des Akkus an einem Tag und erhöht somit die Verfügbarkeit. Höhere Anschaffungskosten pro Akku-Pack werden durch die geringere Anzahl von benötigten Akku-Packs ausgeglichen [35],[36].

### 3.2. Stromregelungsverfahren

#### 3.2.1. Konstant-Stromquelle

Bei diesem Verfahren wird der Akku während der gesamten Ladezeit mit einem konstanten Strom gespeist. Dieses Verfahren ist sehr effektiv und hat einen kleinen Ladefaktor. **Abbildung Fehler! Textmarke nicht definiert.** zeigt eine einfache Schaltung für Aufladung mit Konstantstrom [35].

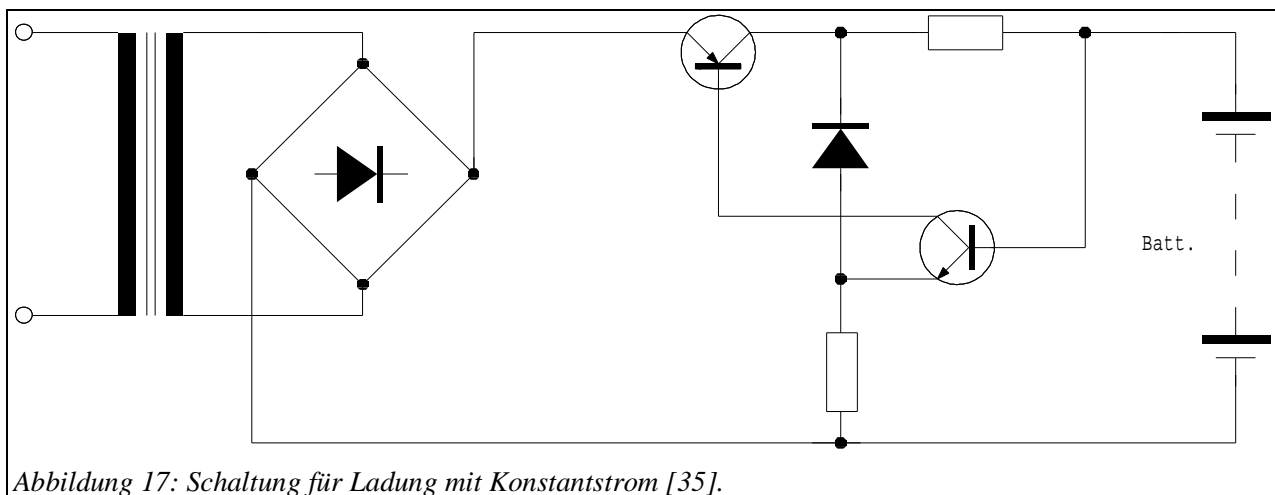


Abbildung 17: Schaltung für Ladung mit Konstantstrom [35].

#### 3.2.2. Quasi-Konstantstromquelle

Dieses Verfahren nutzt einen ohmschen Widerstand zur Stromeinstellung. Der in Serie zum aufzuladenden Akku-Pack geschaltete Widerstand ist so dimensioniert, daß am Ladeende die zur Ladungserhaltung nötige Stromstärke nicht überschritten wird. Abbildung 18 zeigt eine entsprechende Schaltung. Diese einfache Methode spart gegenüber dem oben beschriebenen Verfahren einige Halbleiter ein. Nachteilig ist die auf eine bestimmte Zellenzahl beschränkte Einsatzfähigkeit.

#### 3.2.3. Ladung mit pulsierendem Konstantstrom

Die beiden oben beschriebenen Methoden haben den Nachteil, daß bei Schnellladung hohe Spannungsabfälle an den Zuleitungen und Kontaktwiderständen auftreten und damit Meßwerte stark verfälscht werden. Es ist also sinnvoll, Messungen am Akku nur bei kleinen Strömen oder im stromlosen Zustand durchzuführen. Daher wird der Akku bei diesem Verfahren mit Gleichstromimpulsen

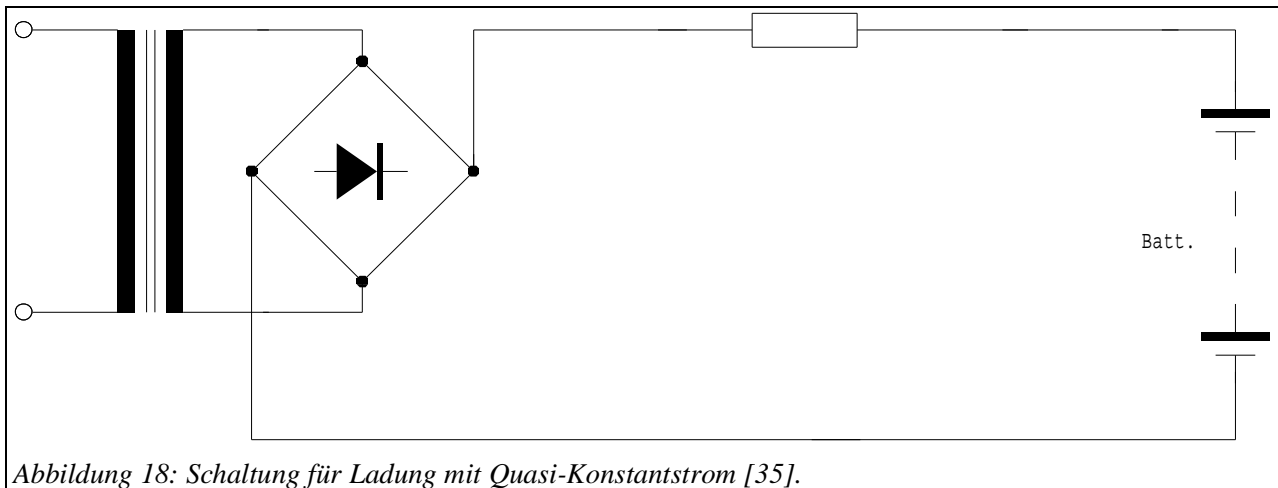


Abbildung 18: Schaltung für Ladung mit Quasi-Konstantstrom [35].

geladen. Die stromlosen Intervalle dienen dann als Meßfenster. Einige Hersteller sind sogar der Ansicht, daß die Ladung mit pulsierendem Strom den Gedächtniseffekt verringert.

#### 3.2.4. sonstige Ladeverfahren

Neben den oben beschriebenen Techniken existieren noch eine ganze Reihe anderer Methoden mit mehr oder weniger komplizierter Stromregelung. Besonders schonend ist zum Beispiel die exponentielle Zurücknahme des Stromes gegen Ladeende. Bei netzunabhängigen Alarmsystemen, Notbeleuchtungen usw. werden oft auch Dauerladeverfahren angewendet, welche die Akkus ständig einsatzbereit halten. Diese Verfahren verwenden meist Stromstärken in der Größenordnung  $1/20 C$  bis  $1/50 C$  [35].

### **3.3. Ladeende-Erkennung**

Zur Erkennung des Ladeendes gibt es verschiedene Kriterien, die in diesem Abschnitt beschrieben werden. Sie können einzeln oder in der Kombination angewendet werden. Im Interesse der Zuverlässigkeit der Ladeende-Erkennung ist aber eine Kombination mehrerer Kriterien sinnvoll.

#### 3.3.1. Zeitüberwachung

Die einfachste Möglichkeit der Ladeende-Erkennung ist eine Messung der Ladezeit. Aus dem Ladestrom und der Ladezeit läßt sich dann die geflossene Ladungsmenge bestimmen. Dieses Verfahren funktioniert nur dann, wenn die aufzuladenden Akkus zu Beginn des Ladevorganges entladen sind. Dies kann aber nur durch ein vorhergehendes Entladen der Akkuzellen sichergestellt werden, was einerseits viel Zeit kostet und andererseits den Ladungsdurchfluß der Akkus unnötigerweise erhöht und damit die Lebensdauer verkürzt. Zusätzlicher Nachteil dieses Verfahrens ist die Beschränkung auf Akkus gleicher Nennkapazität. Für professionelle Anwendungen eignet sich dieses Verfahren daher nicht. Denkbar wäre eine Zeitüberwachung lediglich als zusätzliches untergeordnetes Abschaltkriterium.

### 3.3.2. Temperaturüberwachung

Eine weitere mögliche Ladeende-Erkennung bietet die Überwachung der Zelltemperatur. Hierbei gibt es prinzipiell drei Abschaltkriterien. Die absolute Temperatur der Zelle, die Temperaturänderung der Zelle über der Zeit und die Differenz zwischen Akkutemperatur und Umgebungstemperatur. Die absolute Zelltemperatur ist ähnlich wie die Zeitüberwachung nur als zusätzliches Kriterium einsetzbar. Am sichersten, aber auch am aufwendigsten, ist eine Auswertung der Temperaturänderung der Zelle. Übersteigt sie einen bestimmten positiven Grenzwert, so ist das ein sicheres Indiz für die einsetzende Überladung der Zelle. Der Grenzwert wird von verschiedenen Faktoren, wie zum Beispiel der Bauform des Ladegerätes und der Akkus oder der Position des Meßfühlers, bestimmt. Bei dieser Methode muß beachtet werden, daß der natürliche Temperaturanstieg eines sehr kalten Akkus in einer warmen Umgebung unterhalb des Grenzwertes liegen muß. Andernfalls können solche Akkus nicht geladen werden [35],[37].

### 3.3.3. Spannungsüberwachung

Die Überwachung der Akkuspannung bietet eine weitere Möglichkeit der Ladeende-Erkennung. Als Abschaltkriterium ist in diesem Fall allerdings nur die Spannungsänderung über der Zeit brauchbar, da die absolute Spannung von zu vielen Faktoren beeinflusst wird (Bauform, Alter). Ein voll aufgeladener bzw. bereits leicht überladener Akku läßt sich mit Sicherheit nur am Abfallen seiner Zellenspannung bei Überladung erkennen. Dieser Effekt tritt allerdings nur bei gasdichten Zellen auf. Voraussetzung für eine meßbare negative Spannungsänderung ist eine Laderate oberhalb 1C. Diese Art der Überwachung ist daher nur für Schnellladegeräte geeignet.

## **3.4. Beurteilungskriterien zu Ladeverfahren von NiCd-Akkus**

Um unterschiedliche Ladeverfahren zu vergleichen, sind Beurteilungskriterien nötig. Bei der Beurteilung eines Ladeverfahrens spielen eine große Anzahl von Faktoren eine Rolle. Aus der bisher gewonnenen Erfahrung und heutigen Praxis werden einige geeignete Kriterien zur Beurteilung von Ladeverfahren beschrieben. Besonders wichtig bei allen Schnellladeverfahren sind Zuverlässigkeitsgesichtspunkte, da Fehlfunktionen bei diesen Verfahren leicht zu Schädigungen der Akku-Packs führen. Damit ist die **Abschaltssicherheit** des Gerätes von zentraler Bedeutung ist.

Andererseits soll der **Füllgrad** möglichst hoch und die **Ladezeit** möglichst niedrig sein. Unter dem Aspekt der zu erwartenden **Zellenlebensdauer** ist der **Ladewirkungsgrad** und damit verbunden die Temperaturerhöhung während des Ladens besonders wichtig. Je besser der Ladestrom der momentanen Stromaufnahmefähigkeit der Zellen angepaßt wird, desto höher ist der Ladefaktor und desto schonender das Ladeverfahren.

## 4. ÜBERSICHT AKKULADEGERÄTE

Die steigende Nachfrage nach akkubetriebenen Geräten und Maschinen hat auch vor der Entwicklung neuer Ladegeräte nicht haltgemacht. Der Trend geht hierbei zu immer kürzeren Ladezeiten über einen großen Temperaturbereich mit verbesserten Ladeverfahren. Für jeden Anwendungsbereich findet man Schnellladegeräte, manche nur mit einer Minimalkonfiguration, andere mit hochintegrierten Bausteinen ausgestattet. Diverse Fachzeitschriften bieten ihre Schnelllade-Rezepte an und preisen sie als das "Non-plus-ultra". Auch die meisten im Elektromodellsport aktiven Firmen haben ein oder mehrere Schnellladegeräte in ihrer Produktpalette. Selbstverständlich bietet auch jeder Hersteller von akkubetriebenen Werkzeugen passende Schnellladegeräte an. Eine umfassende Übersicht aller Schnellladegeräte würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, daher werden an dieser Stelle exemplarisch die Geräte einiger der bekanntesten Hersteller vorgestellt.

Im Marktsegment Schnellladegeräte für Werkzeuge liegt der Standard derzeit bei Ladestromstärken von 6A bis 8A mit Ladezeiten von 10 bis 15 Minuten. Es werden allerdings schon Geräte mit Ladestromstärken oberhalb 10A und Ladezeiten unterhalb von 10 Minuten angeboten. Die meisten Ladegeräte dieser Kategorie sind mit einem Mikroprozessor oder Mikrocontroller gesteuert. Über den Ladealgorithmus oder das Abschaltkriterium schweigen sich die Hersteller aus.

	<i>Ladezeit in Min.</i>	<i>Ladestrom in Ampere</i>	<i>Spannungs- bereich in Volt</i>
<i>Bosch GAL 12</i>	12	6A constant	2.4 - 12V
<i>BSG TC 10</i>	11	8.5A	
<i>Friwo</i>		6A variable.	
<i>Hitachi VC 12 YA</i>	12	6A constant	7.2 - 12V
<i>Kress CSS 10</i>	11	8.5A	
<i>Makita DC 9015</i>	15	5.8A constant	7.2 - 9.6V
<i>Metabo ICS 10</i>	10	7.5A	4.8 - 12V
<i>National</i>	6	12A	7.2 - 12V
<i>Panason. EY 0220</i>	15	5A constant	7.2 - 12V
<i>ULO USL-10</i>	140	7A	2.4 - 12V

### 4.1. Definition eines mit einem Fuzzy-Controller gesteuerten Ladegerätes

Die Definition eines mit einem Fuzzy-Controller gesteuerten Schnellladegerätes muß daher unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Entwicklungssituation und dem aktuellen Trend erfolgen. An Hand der bereits genannten Beurteilungskriterien ist zunächst der Nachweis der Anwendbarkeit eines Fuzzy-Controllers auf das Problem der Schnellladung von NiCd-Akkus zu führen und bei positivem Ergebnis für ein Ladegerät mit maximalem Ladestrom von 6 Ampere ein Regelsatz zu entwerfen. Verwendet wird dazu eine Fuzzy-Controllers der nach der Max-Min-Methode arbeitet und die Defuzzifi

zierung mittels der Schwerpunktsmethode durchführt. Dieses Ladegerät sollte Akku-Packs der Größe 7.2V, 9.6V und 12V in vergleichbarer Zeit wie ein Gerät mit 6 Ampere Konstantstrom aufladen können, diese dabei aber schonender behandeln. Der Temperaturanstieg der Akkus während des Ladevorganges darf daher einige Grad Celsius nicht überschreiten, und gegen Ladeende ist der Strom möglichst exponentiell zurückzunehmen. Besonderes Augenmerk ist auf die Ladeende-Erkennung und die 100prozentige Abschaltsicherheit des Verfahrens zu legen. Beim Aufbau der dazu nötigen Entwicklungsumgebung sind einige Randbedingungen zu beachten:

- Die Aufnahme der Meßwerte muß mit 8 BIT Genauigkeit geschehen, die Hardware sollte aber durchaus in der Lage sein, Meßwerte genauer aufzulösen.
- Im Hinblick auf weitere Entwicklungen wird eine Stromquelle benötigt, die mindestens 15 Ampere Konstantstrom liefern kann.
- Zur stromlosen Aufnahme der Meßwerte steht ein 5 Millisekunden großes Meßfenster zur Verfügung. Reicht dieses Fenster nicht aus, so kann bei kleinster Stromstärke (0.6 Ampere) auch länger gemessen werden.
- Im Ladegerät Bosch AI 12 findet ein Mikrocontroller von SGS-Thomson mit 1.8 K ROM Verwendung. Beim Entwurf der Zugehörigkeitsfunktionen und Regeln ist dieser geringe Speicherplatzvorrat zu berücksichtigen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß der Fuzzy-Controller ein relative junges Kapitel der Ingenieurwissenschaften ist, und verschiedene Anwendungsbereiche für ihn erst noch erschlossen werden. Es existieren daher nur relativ wenig Erfahrungswerte auf diesem Gebiet. Auch der Versuch, Ladevorgänge von NiCd-Akkus mit einem Fuzzy-Controller zu regeln, wird mit dieser Arbeit meines Wissens nach erstmals unternommen. Das Entwicklungssystem dient daher dazu, erste Erfahrungen auf diesem Gebiet zu sammeln. Die Definition des Systems mußte daher so flexibel sein, daß im Laufe der Erprobungsphase als Resultat erster Erfahrungen Änderungen an Hardware oder Software vorgenommen werden konnten, die zum Zeitpunkt der Definition nicht absehbar waren.

## 5. AUFBAU DER REGELBASIS

Die Regelbasis eines Fuzzy-Controllers setzt sich zusammen aus einer Anzahl von Zugehörigkeitsfunktionen zu jeder Eingangs- und Ausgangsvariablen und einem Regelsatz. Vorrangiges Ziel beim Entwurf einer Regelbasis ist ihre Vollständigkeit in dem Sinne, daß der Fuzzy-Controller nie in einen Zustand gelangen darf, in dem keine Regel zündet, da er in diesem Fall nicht weiß, wie er reagieren soll. Die Wissensakquisition, die bei klassischen Expertensystemen von speziell geschulten Ingenieuren in Verbindung mit Experten vorgenommen wird, ist für den Fuzzy-Controller wesentlich einfacher. Bis heute gibt es allerdings kein brauchbares Verfahren zum automatisierten Entwurf von Regelbasen, man bedient sich daher immer noch der "trial and error"-Methode. Dennoch gibt es neuerdings Ansätze für lernende Fuzzy-Controller [25]. Obwohl die Algorithmen für ein schrittweises methodisches Annähern an eine für eine spezielle Anwendung optimale Regelbasis noch fehlen, so versuchen wir hier Entwurfsregeln anzugeben, mit deren Hilfe Experten ihr Wissen für einen Fuzzy-Controller beschreiben können. Diese Entwurfsregeln lauten im Einzelnen:

- Die Regelsätze sollten möglichst kompakt sein, d.h. beim Entwurf sollten zuerst die wichtigsten Variablen definiert werden. Jede neue Variable und Regel beeinflusst den gesamten Ablauf und kann das Verfahren wieder undurchsichtig machen (automatische Entwurfsunterstützung).
- Die zu den Variablen gehörenden Zugehörigkeitsfunktionen sollten möglichst kompakt definiert sein (s.o.)
- Die Korrelation der Variablen ist zu beachten.
- Vorsichtig bei der Verknüpfung unkorrelierter Variablen.
- Der gesamte mögliche Zustandsbereich einer Fuzzy-Eingangsvariablen muß mit Zugehörigkeitsfunktionen abgedeckt sein.
- Die Zugehörigkeitsfunktionen sollten sich überlappen (siehe Abbildung 2), Kosko [2] zum Beispiel hält eine Überlappung von 25% für günstig.
- Die Zugehörigkeitsfunktionen sollten möglichst gut mit den semantischen Vorstellungen des Wissensingenieurs übereinstimmen, d.h. es ist zu überlegen in welchem Bereiche genaue Information vorliegt und wo die sogenannten Grauwertbereiche liegen. Wo genaue Information vorliegt sollte diese auch so modelliert werden. In diesem Sinne ist die Aussage von 25% zu verstehen, denn in der Praxis ergibt sich offensichtlich ein deutlicher Unsicherheitsbereich.
- Zu jeder definierten Zugehörigkeitsfunktion muß mindestens eine Regel aufgestellt werden. Ist in dieser Regel eine disjunktive Verknüpfung mit einer Zugehörigkeitsfunktion einer anderen Eingangsvariablen vorhanden, so ist die Korrelation zu beachten (s.o).
- Eine sichere Methode zur Gewährleistung der "Vollständigkeit" einer Regelbasis ist die Aufstellung eines disjunktiven oder konjunktiven Normalsystems von Regeln. Dieses System ist das Analogon zur Normalform der binären Schaltalgebra. Grundvoraussetzung für die Aufstellung des Fuzzy-Normalsystems ist die Abdeckung der Zustandsbereiche aller Fuzzy-Eingangsvariablen mit überlappenden Zugehörigkeitsfunktionen. Dann wird eine Zustandstabelle aufge-

stellt, welche an Stelle der 0 und 1 der binären Schaltalgebra die Namen von Zugehörigkeitsfunktionen enthält. Jede mögliche Kombination von Eingangszuständen wird hier aufgeführt und der gewünschte Ausgangszustand ebenfalls. Diese Methode ist, wie in der binären Logik auch, nur bei einfachen, überschaubaren Systemen anwendbar. Bei drei Fuzzy-Eingangsvariablen mit jeweils drei Zugehörigkeitsfunktionen existieren zum Beispiel bereits  $3 \cdot 3 \cdot 3 = 27$  Kombinationsmöglichkeiten, woraus also ein Regelsatz von 27 Regeln resultiert. (Der erste in dieser Arbeit entworfene Regelsatz wurde mit dieser Methode erstellt.)

- Die Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgangsvariable sollten ebenfalls nicht unschärfer als nötig entworfen werden.
- Die Definition von widersprüchlichen Regeln sollte so weit es geht vermieden werden (automatische Entwurfsunterstützung).

Einige dieser Entwurfsregeln für Fuzzy-Controller sind semantischer Natur, andere können syntaktisch überprüft werden. Hier sind Werkzeuge gefragt, die dem Benutzer den Entwurf erleichtern und diesen auf mögliche Fehler und Ungenauigkeiten überprüfen. Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Darstellung des 'Ableitungsmechanismus' der Ausgangsgrößen. Die bekanntesten Entwurfssysteme für Fuzzy-Controller kommen von Togai-Infra-Logic (U.S.A), Omron (Japan) und Inform (B.R.D). Am Lehrstuhl Bauelemente der Elektrotechnik an der Universität Dortmund ist ein auf die Entwurfsregeln ausgelegtes Werkzeug entwickelt worden.

### 5.1. Beispiel der Vorgehensweise beim Entwurf der Zugehörigkeitsfunktionen und Regeln

Vor dem Entwurf einer Regelbasis steht die Analyse des vorhandenen Expertenwissens und der Erfahrungswerte. Hieraus lassen sich Vorgaben und Randbedingungen ableiten, welche das mit dem Fuzzy-Controller zu steuernde Ladegerät erfüllen muß. Einige wichtige Randbedingungen sind durch die Hardware der Entwicklungsumgebung bzw. durch die Eigenschaften der Regelstrecke "Ladegerät mit NiCd-Akku" festgelegt:

- zwei Meßgrößen (T,U),
- zwei davon abgeleitet Größen (Temperautur- und Spannungsänderung)
- maximaler Ladestrom ist 6 Ampere, minimaler Strom ist 0 Ampere.

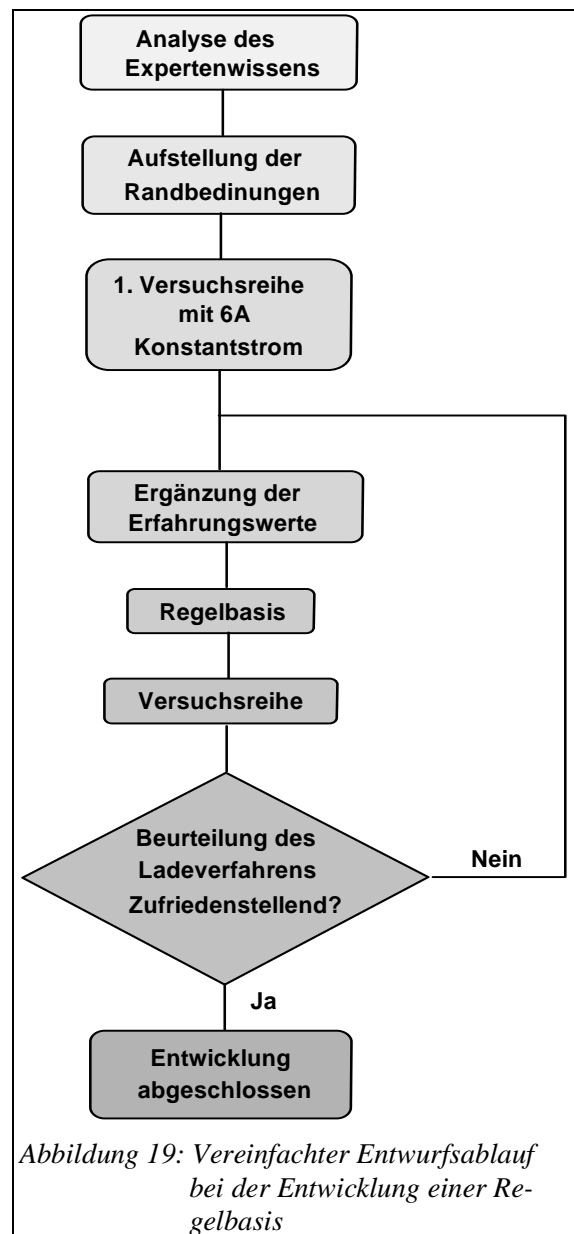


Abbildung 19: Vereinfachter Entwurfsablauf bei der Entwicklung einer Regelbasis

Diese Bedingungen entscheiden über die Anzahl sowie den Zustandsbereich der Fuzzy-Eingangs- und Ausgangsvariablen, andere entscheiden über Lage und Form der Zugehörigkeitsfunktionen. Einige bekannte Eigenschaften von NiCd-Akkus sind zum Beispiel:

- Abnahme der Lebensdauer bei erhöhter Temperatur [37].
- Schnellladung nur zwischen  $-10^{\circ}\text{C}$  und  $50^{\circ}\text{C}$  möglich [37].
- Spannungsüberhöhung bei beginnender Überladung.
- Negatives  $dU$  im Überladebereich.
- Druck- und Temperaturanstieg bei einsetzender Überladung.

Aus diesem Wissen werden folgende Randbedingungen abgeleitet:

- Unterhalb von  $0^{\circ}\text{C}$  nicht laden
- Oberhalb von  $70^{\circ}\text{C}$  nicht laden
- Maximaler Ladestrom im Bereich von  $15^{\circ}\text{C}$  bis  $45^{\circ}\text{C}$
- Bei negativem  $dU$  nicht laden
- Bei starkem Temperaturanstieg nicht laden

An Hand dieser Randbedingungen lassen sich nun erste Zugehörigkeitsfunktionen aufstellen. Schwierig wird dies jedoch bei den Zugehörigkeitsfunktionen für die differentiellen Größen  $dT$  und  $dU$ . Die abgeleiteten Werte sind abhängig von der Meßfrequenz, der Anzahl der zwischengespeicherten Meßwerte und dem verwendeten Berechnungsverfahren. Daher müssen vor der Aufstellung der Zugehörigkeitsfunktionen Testreihen mit konstantem Ladestrom durchgeführt werden. Nach der Auswertung der Meßwerte läßt sich dann eine erste vollständige Regelbasis aufstellen. Diese wird nun nach weiteren Testreihen solange verbessert, bis zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Abbildung 19 zeigt die Vorgehensweise bei der Entwicklung einer Regelbasis für ein Ladeverfahren eines Akkuladegerätes.

## 5.2. Struktur der Testreihen

Jede Testreihe besteht aus 27 Lade- und Entladevorgängen. Es werden hierbei die drei verschiedenen Akkutypen in den drei Anfangstemperaturbereichen kalt, normal, heiß und den drei Füllgraden leer, halbvoll, voll über die Fuzzy-Regelung geladen. Die vor dem Beginn des Ladevorganges leeren Akkus werden unmittelbar nach dem Ladevorgang wieder entladen. Während der Entladung wird alle 15 Sekunden die Entladestromstärke gemessen. Mit Hilfe der Entladezeit läßt sich so die effektiv gespeicherte Ladungsmenge ermitteln. Da die beim Ladevorgang zugeführte Ladungsmenge ebenfalls bekannt ist, läßt sich auf diese Weise der Ladefaktor des Ladeverfahrens bestimmen.

## 5.3. Ergebnisse

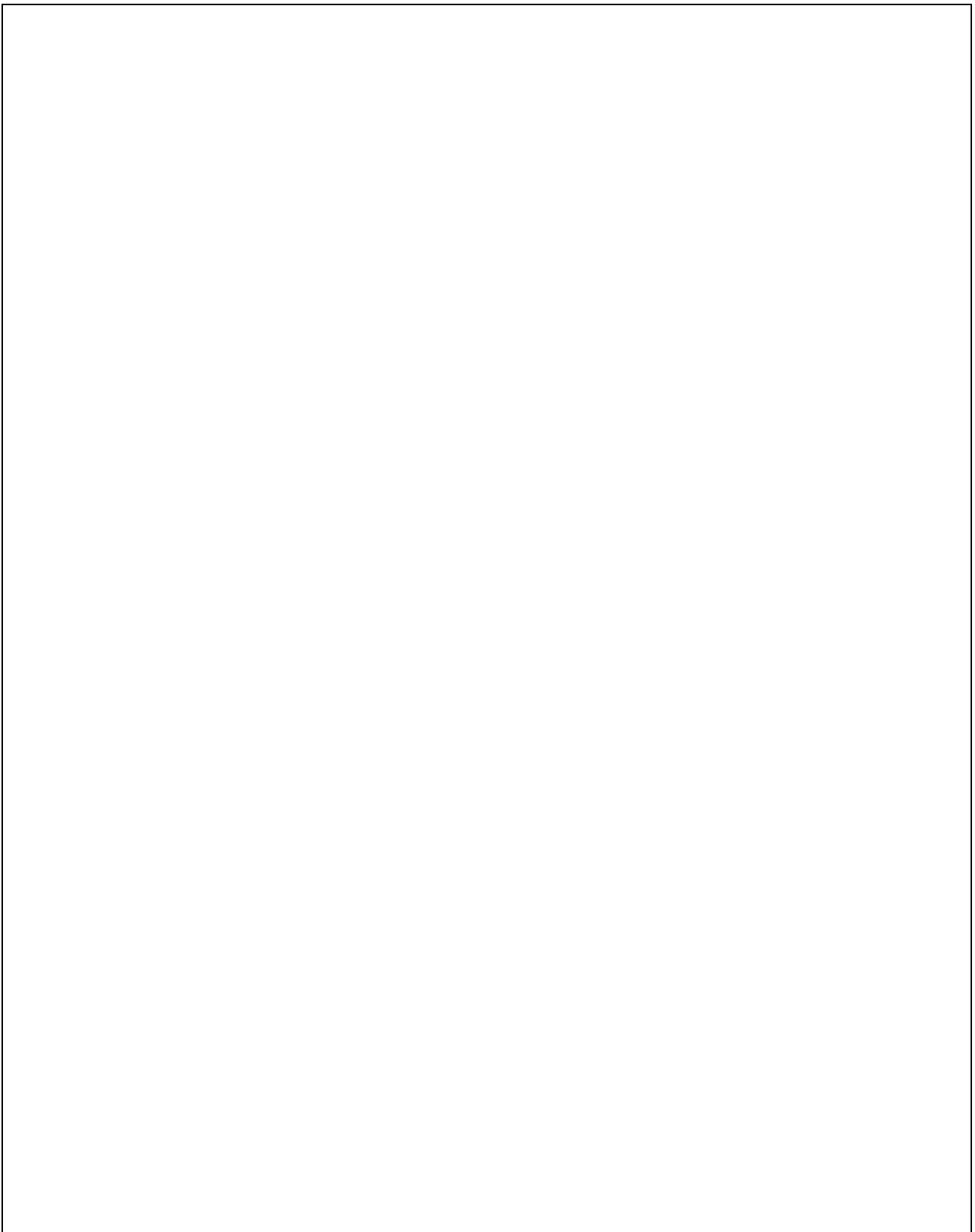
Der ersten Regelbasis sind die Daten einer Meßreihe der Firma Bosch sowie Daten aus einer eigenen Versuchsreihe zugrundegelegt. In beiden Meßreihen wurden verschiedene Akkus mit 6A Konstantstrom geladen und auf dieser Grundlage dann die in den Abbildungen 20 und 21 dargestellte Regelbasis entwickelt. Die Zugehörigkeitsfunktionen für die Temperatur beruhen auf den in Abschnitt 5.1. aufgeführten Randbedingungen, die Zugehörigkeitsfunktionen der differentiellen Größen  $dT$  und  $dU$  basieren auf den oben erwähnten Meßreihen. Mit den 4+3+3 Zugehörigkeitsfunktionen lassen

$4 \cdot 3 \cdot 3 = 36$  Kombinationen bilden, ein Normalsystem von Regeln muß demnach 36 Regeln enthalten. Der in Abbildung 21 vorgestellte Regelsatz enthält 12 Regeln (Regel 1 bis 12), die jeweils eine Kombination von Zugehörigkeitsfunktionen abdecken und drei Regeln (Regel 13 bis 15), die insgesamt 24 Kombinationsmöglichkeiten von Zugehörigkeitsfunktionen abdecken. Die Regeln 1 bis 12 können in Kombination miteinander aktiviert werden und die Regeln 13 bis 15 ebenfalls. Allerdings kann keine der Regeln 13 bis 15 in Kombination mit einer der Regeln 1 bis 12 voll aktiviert werden. Ein kombiniertes Aktivieren von Regeln aus diesen beiden Gruppen ist nur im Bereich der Flanken der Zugehörigkeitsfunktionen möglich. Damit ist sichergestellt, daß bei voller Aktivierung einer der drei Regeln 13 bis 15 der Strom abgeschaltet und der Ladevorgang beendet wird. Diese drei Regeln werden daher auch als Abschaltregeln bezeichnet.

Entscheidend für die korrekte Funktion des Ladegerätes ist auch die Zellenzahlerkennung. Diese muß absolut sicher funktionieren, da die Zellenzahl zur Normierung der Spannung benötigt wird. Nur so ist das komfortable Laden verschiedener Akku-Packs mit ein- und demselben Ladegerät möglich. Schwierigkeiten bereitet hierbei vor allen Dingen das Einschwingverhalten der Akkuspannung zu Beginn der Ladephase. Daher kann die Zellenzahl erst nach einer gewissen Vorladezeit mit Konstantstrom sicher bestimmt werden. Nach der Zellenzahlerkennung wird noch weitere 20 bis 30 Sekunden mit Konstantstrom vorgeladen, bevor der Fuzzy-Controller die Stromregelung übernimmt.

Der erste Regelsatz kann um eine Spannungsregel erweitert werden, welche zusätzlich zu einer der 15 anderen Regeln zünden kann. Zündet nur diese Regel, so liegt der Ausgabewert bei 0Ampere, so daß die Funktion der Abschaltregeln 13 bis 15 nicht gefährdet wird.

Diese erste Regelbasis funktioniert bei fast allen der in 5.2 aufgeführten Anfangsbedingungen schon recht gut, Schwierigkeiten gibt es jedoch bei kalten, leeren Akkus. Hier kommt es häufig zu einem verfrühten Abschalten des Ladevorganges kurz nach dessen Beginn. Hervorgerufen wird dies durch ein Überschwingen der Akkuspannung zu Beginn der Ladephase, wodurch ein manchmal mehrere Minuten andauerndes negatives  $dU$  auftritt. Bei Übergabe der Ladekontrolle an den Fuzzy-Controller zündet dann die  $-dU$  Regel (Regel Nr. 13), was zu einem Abschalten des Ladevorganges führt (siehe auch Abbildung 26).



*Abbildung 20: Linguistische Variablen und deren Zugehörigkeitsfunktionen der ersten Regelbasis*

Die folgenden Seiten zeigen Ladekurven, denen diese Regelbasis zugrunde liegt. Alle abgebildeten Kurven beinhalten eine 15 Sekunden dauernde Nachmeßzeit bei kleinster Stromstärke (0.6A).

- Abbildung 22 zeigt einen Ladevorgang, wie er in der Praxis häufig vorkommt. Ein leerer Akku mit überhöhter Anfangstemperatur (43°C) wird unmittelbar nach dem Entladen wieder aufgeladen. Dies entspricht zum Beispiel folgender Situation: Der Akku war bei mäßiger bis starker Beanspruchung in Gebrauch, hat sich dabei erwärmt und wird nun wieder aufgeladen. Der abgebildete Ladevorgang dauerte ungefähr 15 Minuten.
- In Abbildung 23 ist ein Ladevorgang mit einem extrem heißen, leeren Akku dargestellt. Dieser Akku ist bereits nach 13 Minuten voll geladen. Dies ist auf die geringere Kapazität bei höheren Temperaturen zurückzuführen, eventuell aber auch auf einen Memory-Effekt. Um diese hohe Anfangstemperatur zu erreichen, wurde dieser Akku nämlich mehrmals mit 6 Ampere einige Minuten angeladen und dann mit über 10 Ampere entladen.
- Abbildung 24 zeigt das Verhalten des Fuzzy-Controllers bei einem annähernd normal temperierten, vollen Akku. Das Ladeende wurde bei diesem Ladevorgang nach weniger als 3 Minuten erkannt.
- In Abbildung 25 ist versuchsweise eine Spannungsregel (Regel Nr. 16) in die Regelbasis aufgenommen worden. Es zeigt sich ein sehr deutlicher Effekt: Eine frühzeitige exponentielle Rücknahme des Ladestromes mit dem Vorteil der sehr schonenden Behandlung des Akkus und dem Nachteil einer längeren Ladezeit von 20 Minuten. Bedingt durch die Temperaturabhängigkeit der Zellenspannung funktioniert diese Regel nur in einem eingeschränkten Temperaturbereich zufriedenstellend.

Nr.	If-Teil	Then-Teil
-----	---------	-----------

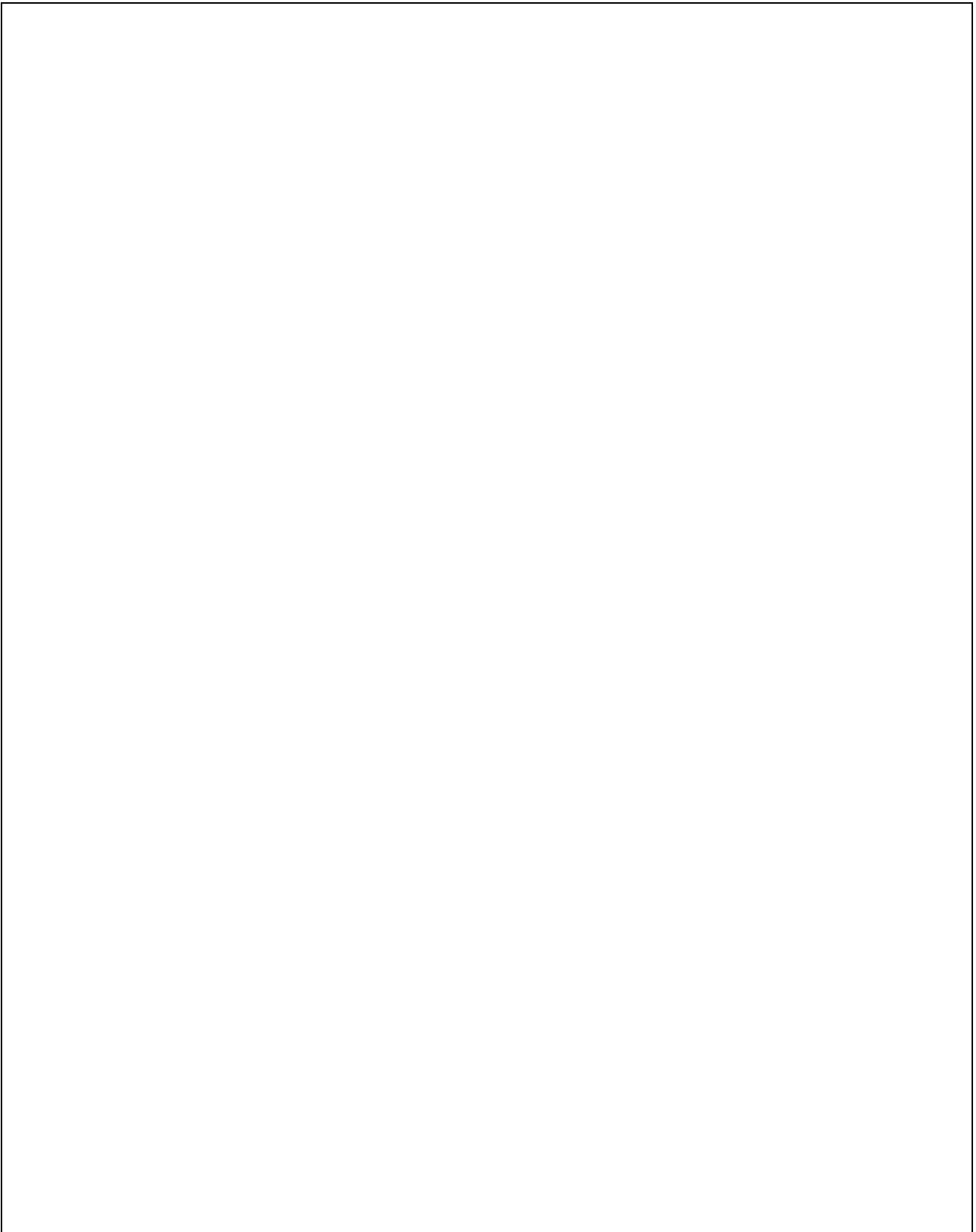
	T	dT	dU	I
1	normal	negativ	normal	6
2	normal	normal	normal	6
3	normal	negativ	groß	2
4	normal	normal	groß	2
5	normal	groß	normal	0
6	normal	groß	groß	0
7	groß	negativ	normal	6
8	groß	normal	normal	4
9	groß	negativ	groß	2
10	groß	normal	groß	0
11	groß	groß	normal	0
12	groß	groß	groß	0
13	*	*	negativ	0
14	zu klein	*	*	0
15	zu groß	*	*	0

\* := beliebige Mitgliedschaftsfunktion

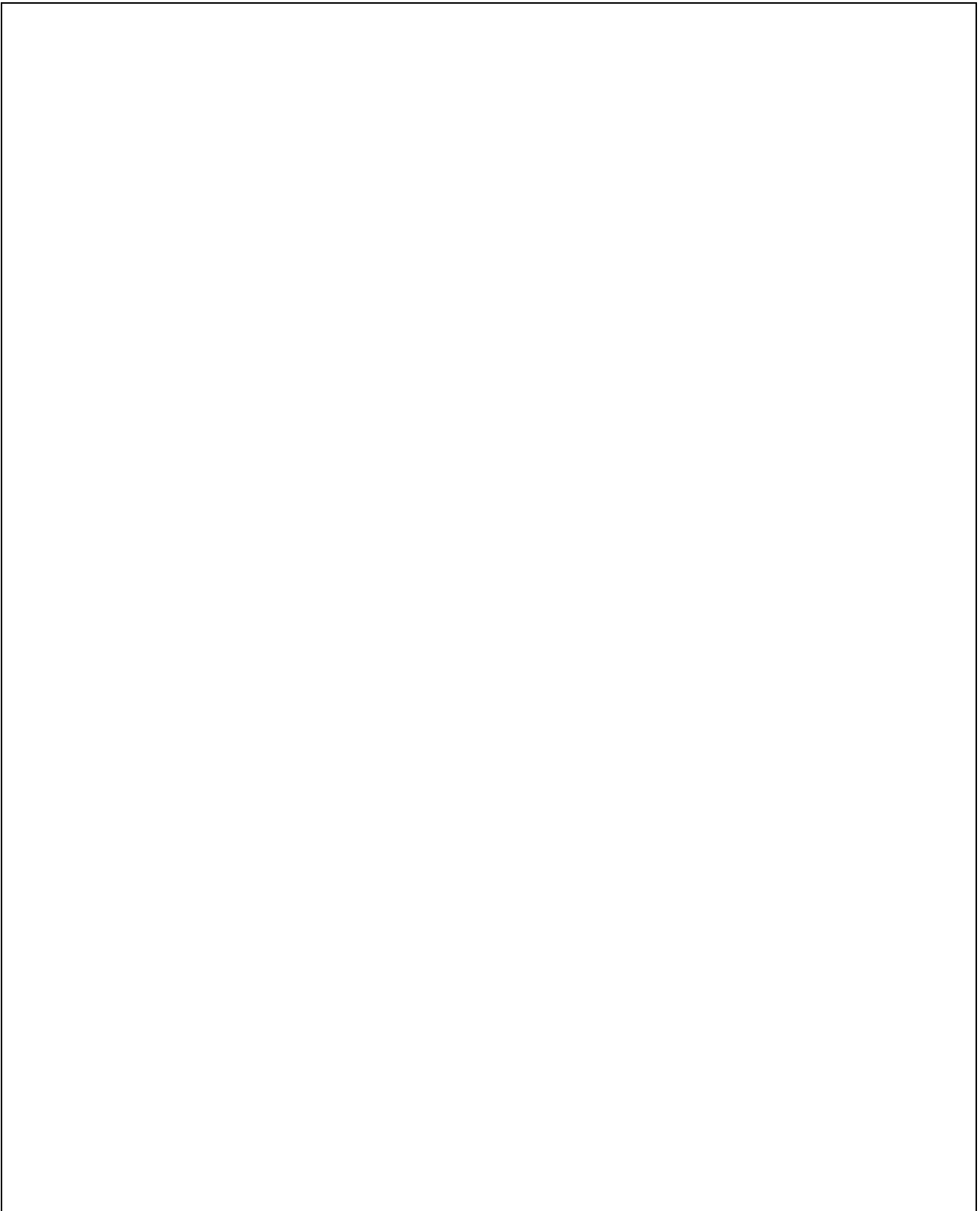
	U	I
16	hoch	i exp

zusätzliche Spannungsregel, die dem Regelsatz versuchsweise zugeschaltet werden kann

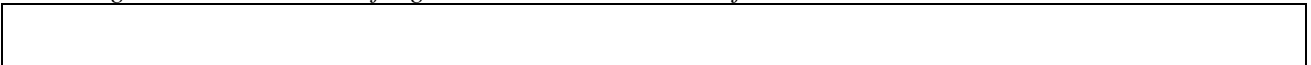
Abbildung 21: Regelsatz der ersten Regelbasis

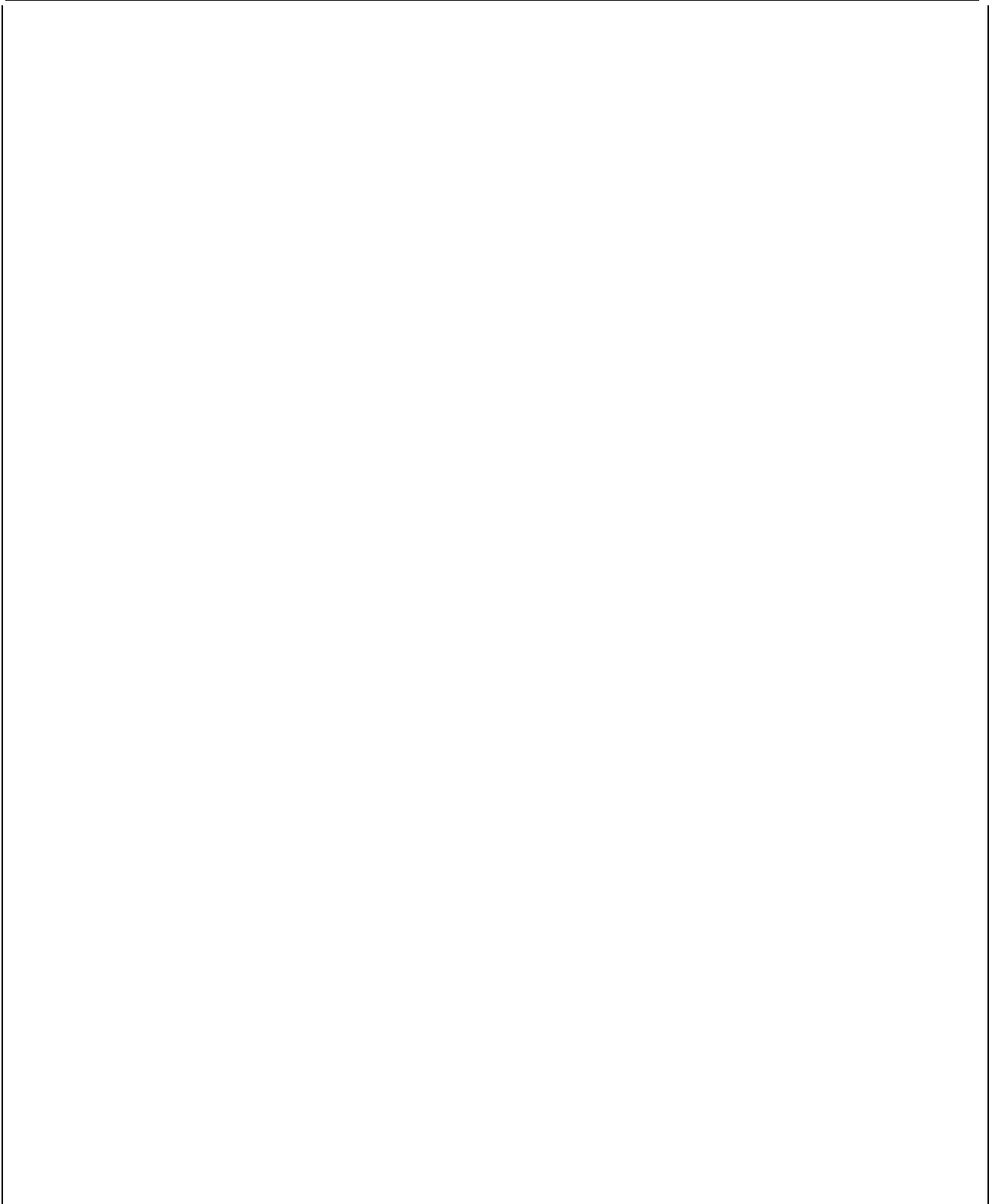


*Abbildung 22: 9.6V-Akku mit Anfangszustand leer und 43°C warm*

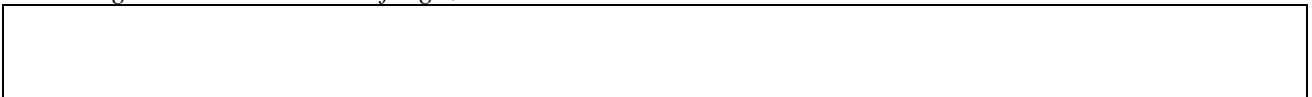


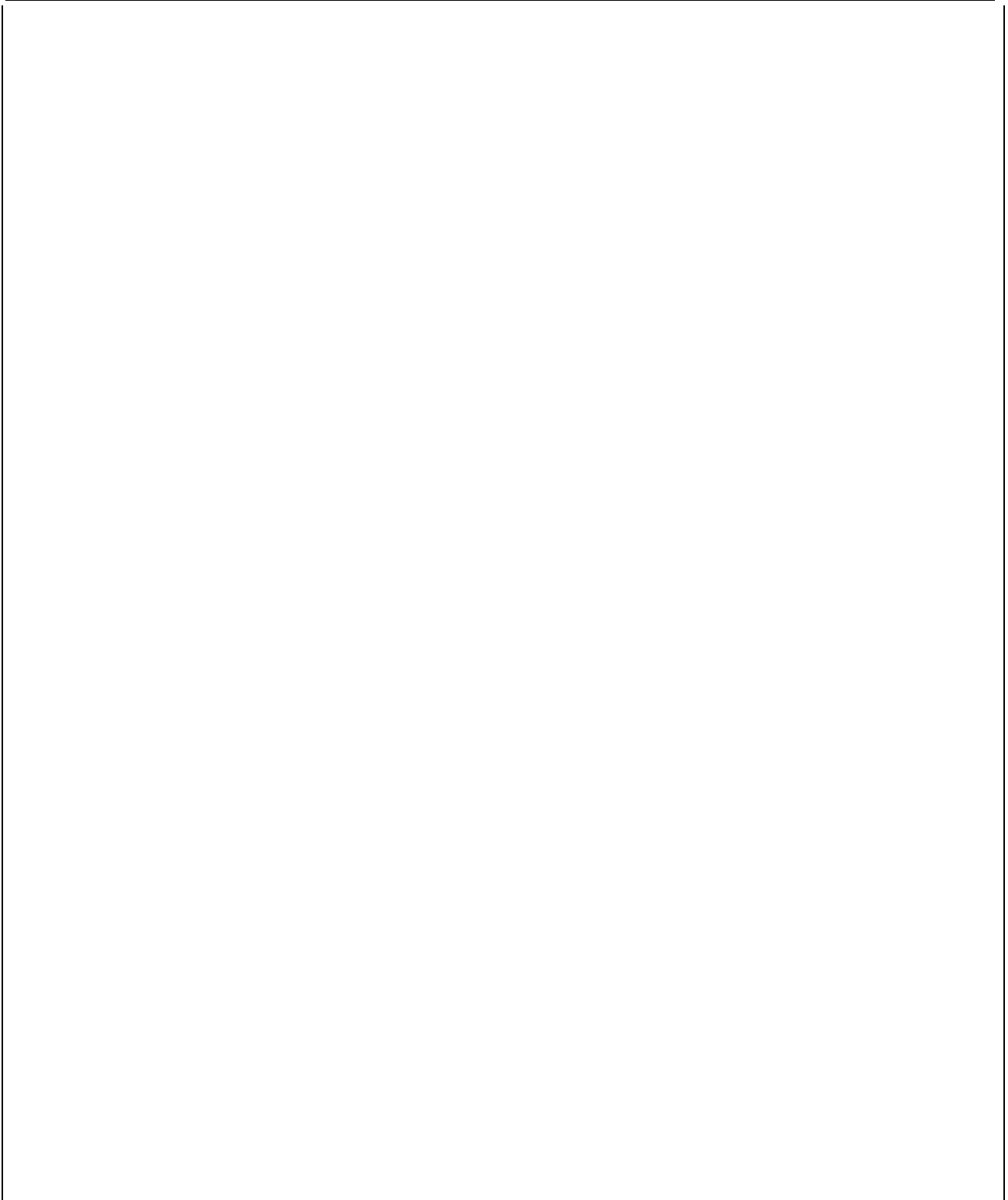
*Abbildung 23: 12V-Akku mit Anfangszustand leer und 72°C heiß*





*Abbildung 24: 9.6V-Akku mit Anfangszustand voll und 32°C warm*





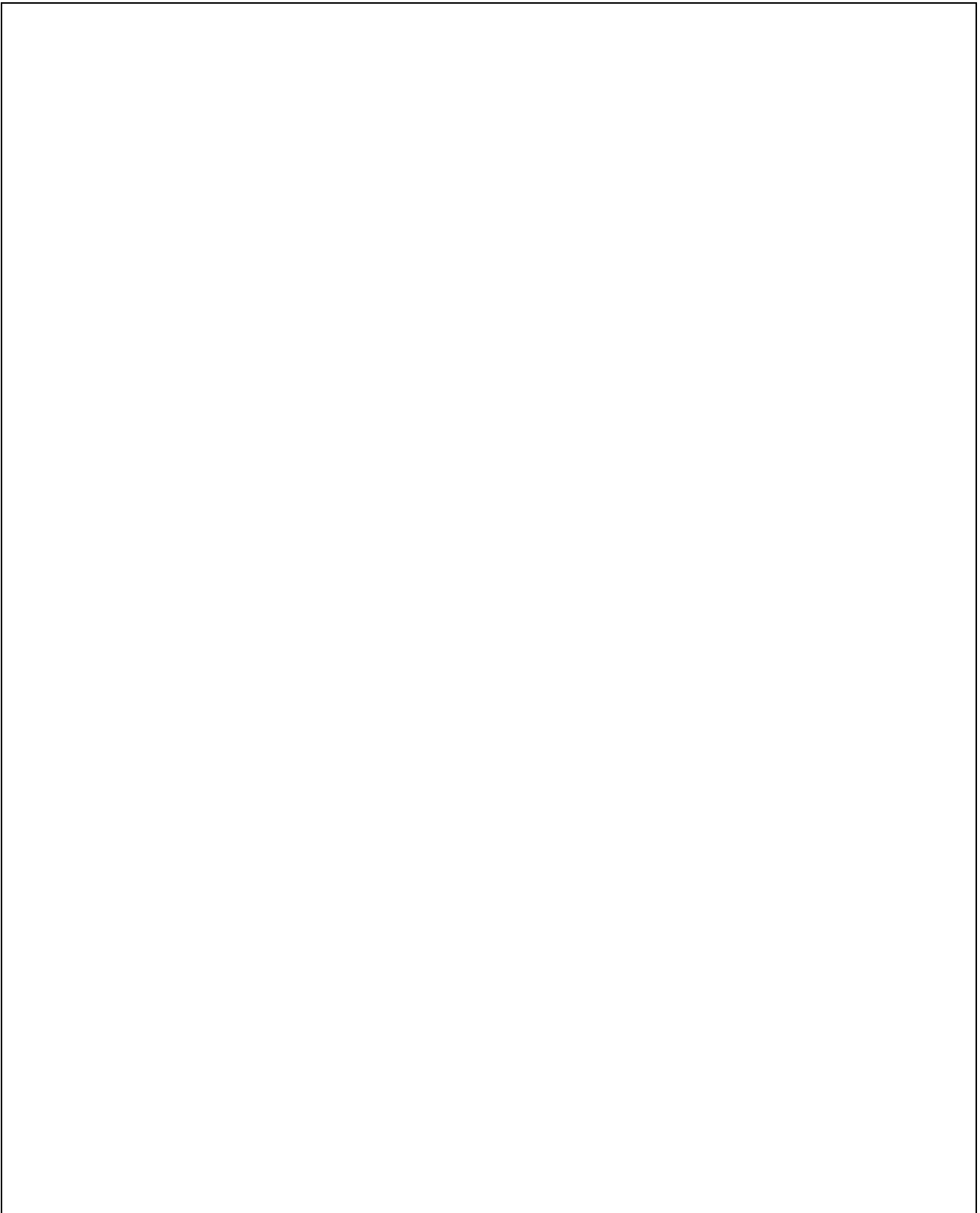
*Abbildung 25: 12V-Akku mit Anfangszustand leer und 14°C warm und Spannungsregel Nr. 16*

Bei allen mit dieser Regelbasis aufgenommenen Kurven wurde zwischen zwei Meßzyklen jeweils eine Sekunde lang geladen; die Glättung der Meßwerte beruht auf einer Mittelwertbildung aus vier Meßwerten. Der treppenförmige Verlauf der einzelnen Kurven resultiert aus der auf 8 Bit begrenzten Auflösung der Wandler. Der Abstand zwischen zwei Stufen entspricht der Auflösung der jeweiligen Meßgröße. Bei 8 Bit Wandlerauflösung erreicht man für die Temperatur eine Auflösung von  $0.7^{\circ}\text{C}$  und für die Spannung eine Auflösung von ungefähr 100mV.

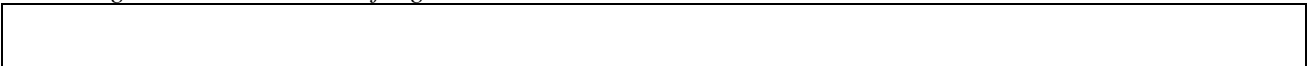
Bei den in Abbildung 23 und 25 dargestellten Ladekurven führte die -dU Regel (13) zum Ladeende, und bei den beiden anderen Kurven resultierte das Ladeende aus dem Zünden der Regel Nr. 5 (hohes dT). Wegen der Nachmeßphase ist das Ladeende nicht erst beim letzten abgebildeten Meßwert erreicht, sondern bereits 15 Meßzyklen früher aus den Diagrammen ablesbar.

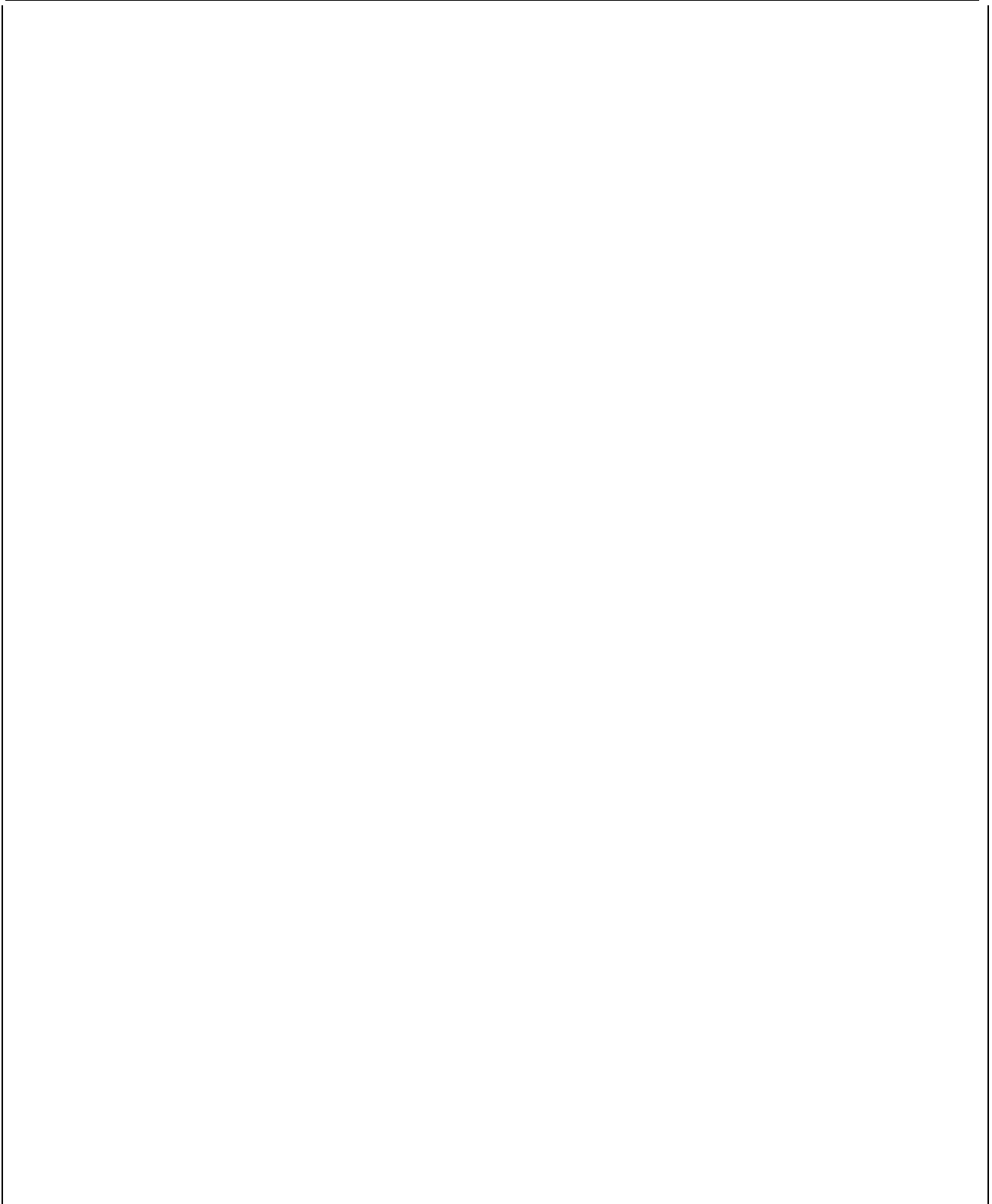
In zahlreichen Ladeexperimenten mit dieser Regelbasis hat sich die Empfindlichkeit des Fuzzy-Reglers bei transienten Störungen gezeigt, wie sie zum Beispiel durch Wackelkontakte des Akkus in seiner Fassung auftreten können, aber auch durch kurzzeitige Schwankungen der Zellenspannung, deren Ursachen unbekannt sind. Im nächsten Entwicklungsschritt wurde der Fuzzy-Controller daher um einen Verzögerungsmechanismus mit variabler Zeitkonstante erweitert: Eine vom Fuzzy-Controller berechnete Stromstärke läßt sich erst nach Verstreichen der Verzögerungszeit einstellen. Außerdem läßt sich der Strom unabhängig vom Ergebniswert des Fuzzy-Controllers jeweils nur um eine Stufe erhöhen oder verringern. Durch diesen Mechanismus lassen sich alle Störungen mit einer Zeitkonstante, die kleiner ist als die Verzögerungszeit des Fuzzy-Controllers, kompensieren. Die auf den folgenden Seiten abgebildeten Ladekurven beruhen auf der bereits vorgestellten Regelbasis und den oben erwähnten Ladeparametern unter zusätzlicher Verwendung einer Verzögerungszeit von 5 Sekunden:

- Die Abbildung 26 zeigt einen Ladeversuch mit kaltem, leeren Akku. Hier reicht die Verzögerungszeit bei weitem nicht aus, um ein negatives dU zu Beginn des Ladevorganges zu kompensieren. Der Fuzzy-Controller schaltet bereits nach weniger als zwei Minuten ab.
- In den Abbildungen 27 und 28 sind Ladekurven von leeren Akkus mit den Anfangstemperaturen  $25^{\circ}\text{C}$  und  $58^{\circ}\text{C}$  dargestellt. Der zu Beginn heiße Akku erreicht erst nach 19 Minuten das Ladeende, da im hohen Temperaturbereich mit verringerter Stromstärke geladen wird. Der andere Akku ist bereits nach 16 Minuten voll geladen.
- Die Abbildung 29 zeigt das Verhalten des Fuzzy-Controllers beim Laden eines vollen Akkus im normalen Temperaturbereich. Dies ist eine Situation, die in der Praxis häufig vorkommen kann. Hier erkennt der Fuzzy-Controller bereits nach weniger als zwei Minuten korrekt das Ladeende.



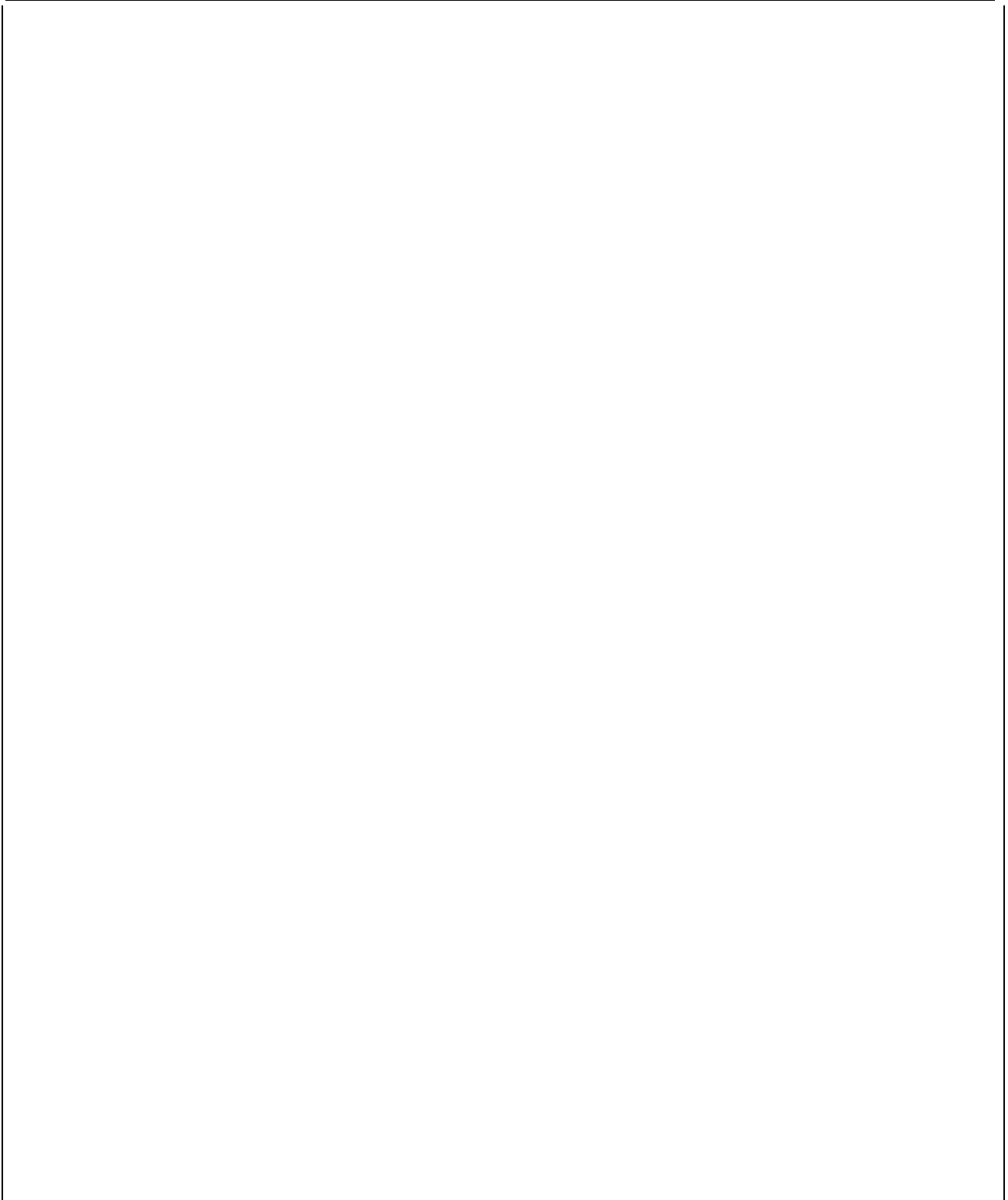
*Abbildung 26: 12V-Akku mit Anfangszustand leer und -4°C kalt*





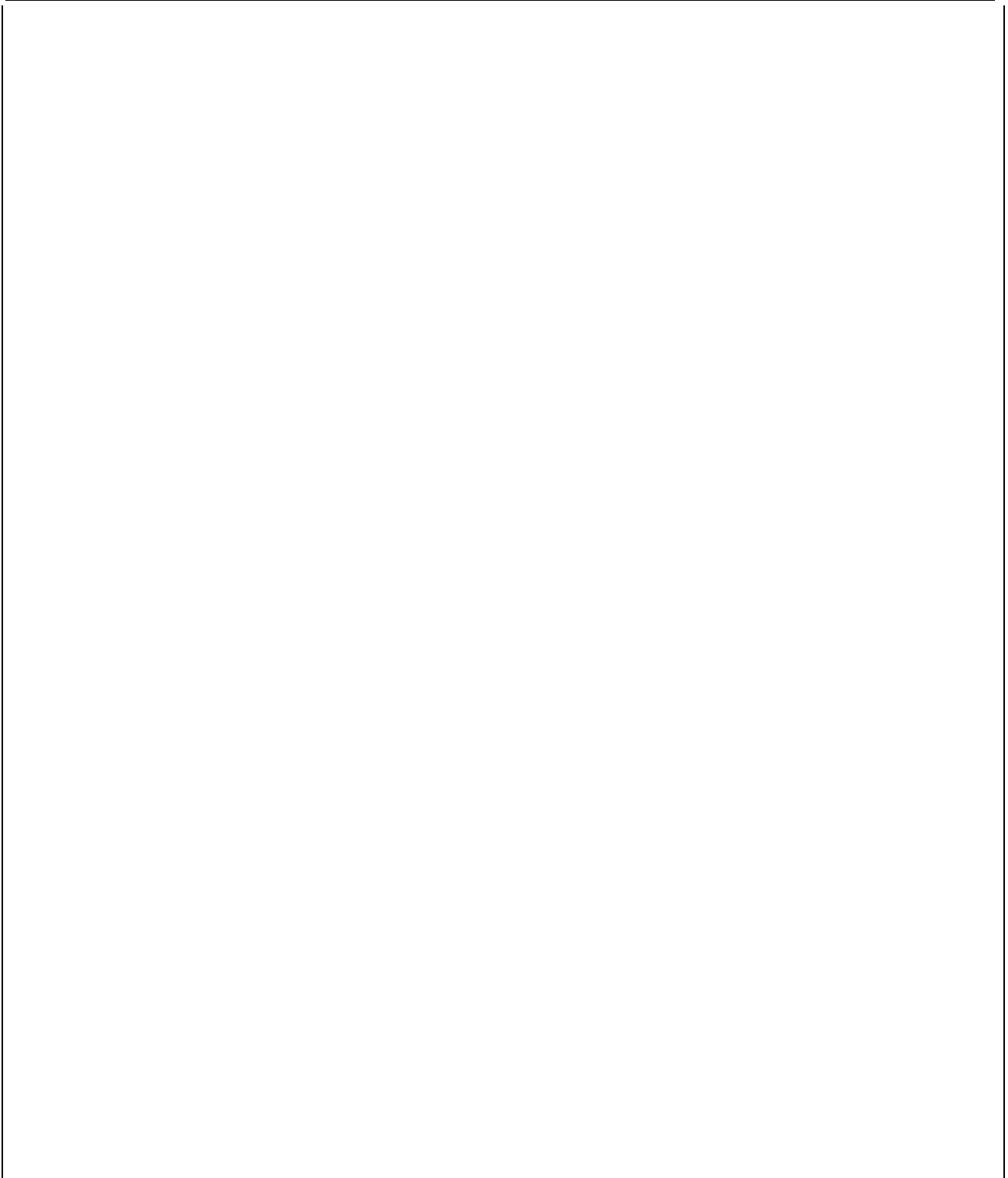
*Abbildung 27: 12V-Akku mit Anfangszustand leer und 25°C warm*





*Abbildung 28: 12V-Akku mit Anfangszustand leer und 58°C heiß*





*Abbildung 29: 12V-Akku mit Anfangszustand voll und 24°C warm*

Die abgebildeten Diagramme sind gegenüber den ersten vier Diagrammen um eine zusätzliche Stromkurve erweitert. Die linke, mit "I" bezeichnete Kurve, zeigt die Stromwerte, die der Fuzzy-Controller auf der Basis seiner Eingangswerte errechnet, und die rechte, mit "I<sub>Akku</sub>" gekennzeichnete Kurve, zeigt die tatsächliche, den Akku durchfließende Ladestromstärke. Es ist deutlich eine verringerte, wenn auch nicht vollständig unterdrückte, Schwingneigung des Fuzzy-Controllers zu erkennen. Trotz dieser Verbesserung des Regler-Verhaltens bleiben mit diesem Regelsatz zwei Probleme ungelöst:

- Kalte Akkus werden nicht geladen. Hier erfolgt die Abschaltung des Ladestromes kurz nach Ladebeginn.
- Durch eine frühzeitige, möglichst exponentielle Rücknahme des Ladestromes gegen Ende der Ladephase sollen die Akkus schonend geladen werden, ohne das dadurch die Ladezeit nennenswert länger wird.

Beide Probleme sind mit Hilfe zusätzlicher Fuzzy-Regeln und dem Einsatz einer oder eventuell mehrerer zusätzlicher Eingangsvariablen für den Fuzzy-Controller zu lösen. Die Ladeschwierigkeiten bei kalten Akkus könnten zum Beispiel unter Verwendung der Ladezeit als Fuzzy-Eingangsvariable und zwei bis drei zusätzlichen Regeln beseitigt werden. Die exponentielle Rücknahme des Ladestromes gegen Ladeende läßt sich, wie bereits in Abbildung 25 gezeigt, durch die Einführung der absoluten Spannung als Fuzzy-Eingangsvariable und eine entsprechende Spannungsregel erreichen. Verwendet man nun an Stelle einer einzigen Spannungsregel mehrere für verschiedene Temperaturbereiche optimierte Regeln, so ist ein verbessertes Reglerverhalten gegen Ladeende zu erwarten. Voraussetzung für die Entwicklung neuer Spannungsregeln ist die Aufstellung zusätzlicher Zugehörigkeitsfunktionen für Temperatur und Spannung und eventuell auch für die Stromstärke. Gegebenenfalls kann sogar die Stromstärke als zusätzliche Eingangsgröße verwendet werden.

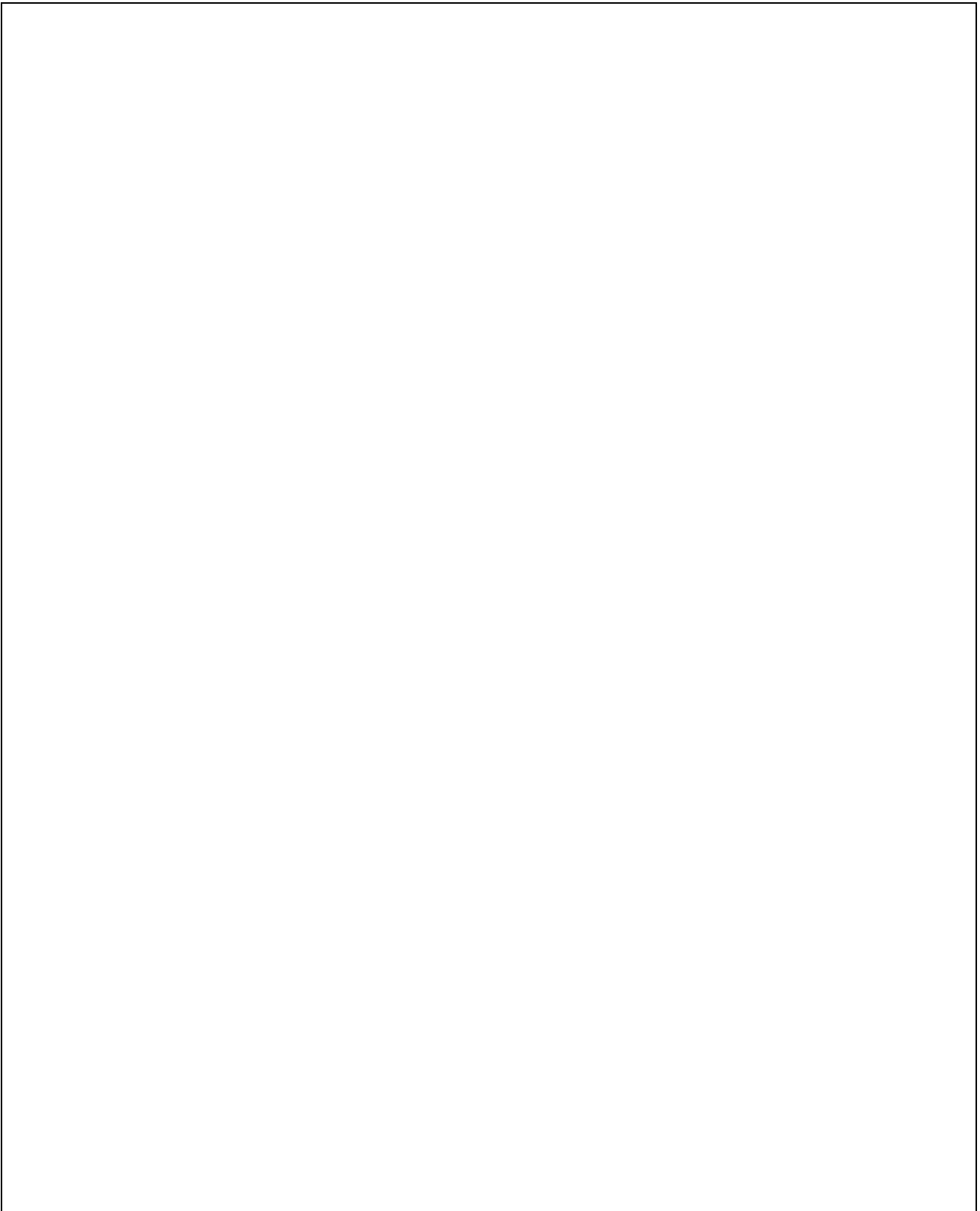
Im weiteren Verlauf der Arbeit wird dieser Weg nicht weiter verfolgt, er mag aber als Anregung für nachfolgende Experimente dienen. Im Gegensatz zur oben vorgeschlagenen Erweiterung und Ergänzung der Regelbasis wird bei ihrer Weiterentwicklung eine Reduzierung der Regeln und Zugehörigkeitsfunktionen in den Zustandsbereichen der Regelstrecke angestrebt, die auf einfache Art und Weise durch herkömmliche IF-THEN Anweisungen überwacht werden können. Ziel dieser Mischtechnik ist die Optimierung des Reglers bezüglich Speicherplatzbedarf und Geschwindigkeit. Diese Vorgehensweise ist nur sinnvoll im Hinblick auf die industrielle Großfertigung des Fuzzy-Ladegerätes, da hier wirtschaftliche Gesichtspunkte (Kosten) eine entscheidene Rolle spielen.

Im Laufe der weiteren Untersuchungen werden noch folgende Änderungen und Verbesserungen eingeführt:

- Die Anzahl der Zugehörigkeitsfunktionen für die Temperatur wurde von vier auf drei Zugehörigkeitsfunktionen reduziert
- Die Spannungsregel wurde durch die Möglichkeit einer Adaptierung verbessert. Das heißt: Abhängig von einem bestimmten Zustand der Regelstrecke werden die Flanken der Spannungs-Zugehörigkeitsfunktionen verschoben
- Reduzierung der Regelbasis auf 10 Regeln
- Einführung einer zusätzlichen harten Abschaltbedingung

Das Resultat der oben angeführten Modifikationen ist die Kombination einer Regelbasis mit einer Liste herkömmlicher if-then Anweisungen, welche in allen durchgeführten Ladeexperimenten zufriedenstellend gearbeitet hat. Diese Regelbasis wird als Ergebnis der Studie in den Abbildungen 30 und 31 auf den folgenden Seiten vorgestellt. Eine weitere Reduktion der Anzahl Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsvariablen dT und dU von 3 auf 2 könnte die Anzahl der Regeln noch

mals reduzieren. Die Auswertung der Fuzzy-Eingangsvariablen läuft folgendermaßen ab: Zuerst erfolgt, wenn nötig, die Adaptierung der Zugehörigkeitsfunktionen der Spannung. Einmal angepaßt, verbleiben diese bis zum Ende des Ladevorganges in dieser adaptierten Form. Als nächstes wertet der Fuzzy-Controller seine Eingangsvariablen aus und stellt unter Berücksichtigung seiner Verzögerungszeit einen in diesem Sinne optimalen Stromwert ein. Dannach erfolgt die Auswertung der konventionellen If-Then Regeln in einer höheren Ebene. Diese stellt z.B sicher, daß der gesamte Schnellladevorgang terminiert, wenn der Fuzzy-Controller eine gewisse Zeit einen konstanten Ladestrom (z.B. 0 Ampere) einstellt. Sie schaltet dann auf Ladungserhaltung (siehe Abschnitt 3.1.1.) um.



*Abbildung 30: Zugehörigkeitsfunktionen der reduzierten Regelbasis*

Um die Funktion der vorgestellten Regelbasis zu demonstrieren, sind auf den folgenden Seiten sechs Ladekurven mit charakteristischen Anfangsbedingungen dargestellt:

- Abbildung 32 zeigt einen vollen, zu Beginn der Ladephase 6°C kalten Akku. Hier ist gut zu erkennen, wie der Ladestrom mit ansteigender Temperatur hochgeregelt wird. Das Ladeende erreicht dieser Akku erst nach 9 Minuten, da der Akku vor diesem Ladeexperiment mehr als 12 Stunden lang gekühlt wurde und in dieser Zeit Kapazität durch Selbstentladung verlieren konnte.
- Abbildung 33 stellt die Ladekurve eines vollen, 36°C warmen Akkus dar. Das Ladeende wird hier schon nach 2 Minuten erreicht.
- Der in Abbildung 34 gezeigte Ladevorgang mit vollem 64°C heißem Akku erreicht sogar schon nach 1.5 Minuten das Ladeende.

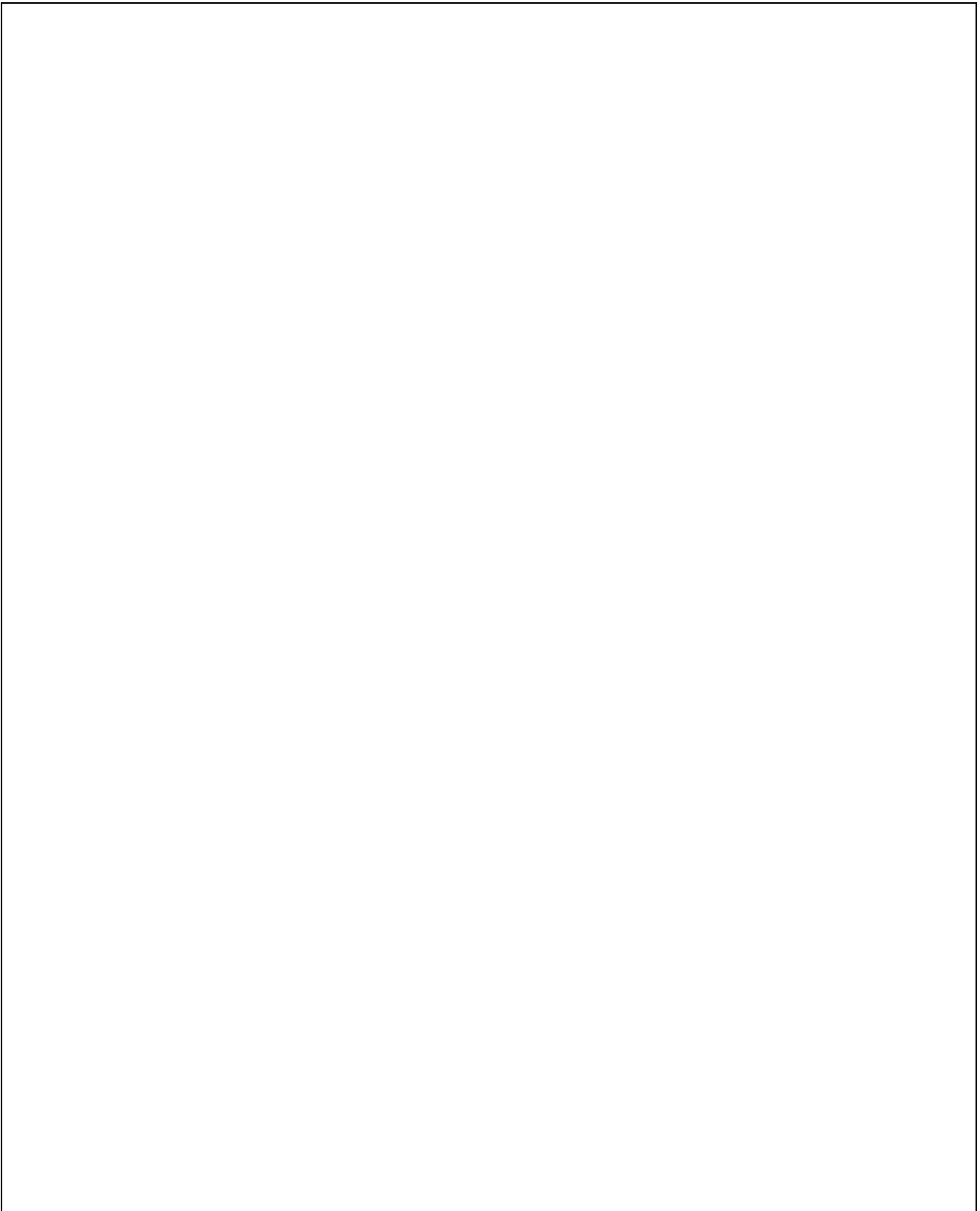
- Der Ladevorgang eines leeren, 2°C kalten Akkus ist in Abbildung 35 dargestellt. Er dauert, wie erwartet, wegen der kleinen Ladestromstärke sehr lange, in diesem Fall 31 Minuten. Dafür wurde hier ein Ladefaktor von 1.3 bis 1.4 erreicht.
- Abbildung 36 zeigt die Ladekurve eines leeren, 19°C warmen Akkus. Dieser lädt fast während der gesamten Ladedauer von 18 Minuten mit 6A, und erst gegen Ladeende wird die Stromstärke stufenweise reduziert. Der Ladefaktor liegt hier wegen der hohen Laderate nur bei 1.6 bis 1.7.
- Als letzte Ladekurve zu dieser Regelbasis ist in Abbildung 37 der Ladevorgang eines leeren, fast 64°C heißen Akkus dargestellt. Erst mit sinkender Akku-Temperatur kann hier die volle Stromstärke von 6A eingestellt werden, woraus jedoch ein etwas besserer Ladefaktor von 1.5 bis 1.6, aber eine längere Ladezeit von fast 24 Minuten resultiert. Gegen Ladeende erfolgt auch hier eine stufenweise Verminderung der Stromstärke. Bei diesem Ladevorgang wurde die Adaptierung der Spannungs-Zugehörigkeitsfunktionen erforderlich, was man an dem Sprung der Spannungskurve auf 1.6V erkennen kann.

Bei allen abgebildeten Ladekurven zündet gegen Ende der Ladephase die Regel Nr. 7, beim vollen, heißen Akku zusätzlich noch die Regeln Nr. 9 und Nr. 4 und beim leeren, heißen Akku die Regel Nr. 9 und die adaptierte Regel Nr. 1. Das Ladeende wird in allen Fällen durch den Fuzzy-Controller durch das Zünden entsprechender Regeln mit einer stufenweisen, jeweils um fünf Sekunden verzögerten Stromreduzierung eingeleitet. Beschleunigt wird der Abschaltvorgang in allen abgebildeten Ladekurven durch die Unterstützung der konventionellen Abschaltbedingung.

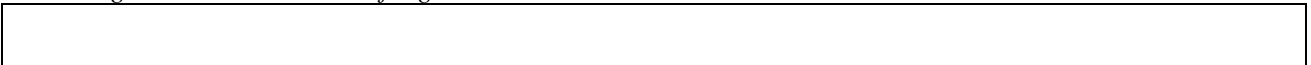
Nr.	If-Teil				Then-Teil
1	*	*	hoch	*	0
2	niedrig	*	*	*	2
3	normal	negativ	*	klein	6
4	normal	klein	*	klein	6
5	normal	positiv	*	klein	4
6	normal	*	*	positiv	6
7	normal	*	*	negativ	0
8	hoch	negativ	*	*	2
9	hoch	klein	*	*	0
10	hoch	positiv	*	*	0

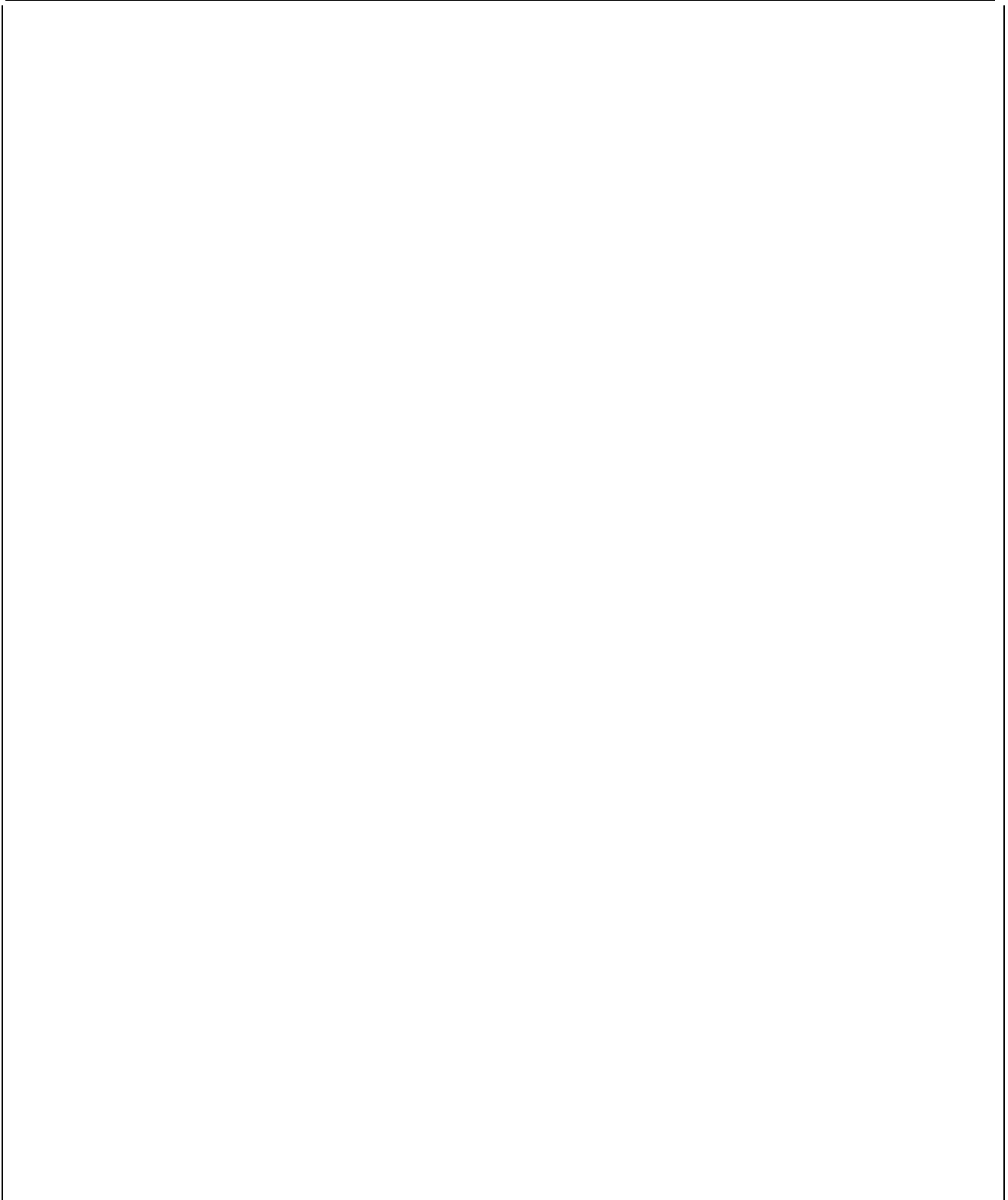
\* . = beliebige Mitgliedschaftsfunktionen

Abbildung 31: Reduzierter Regelsatz



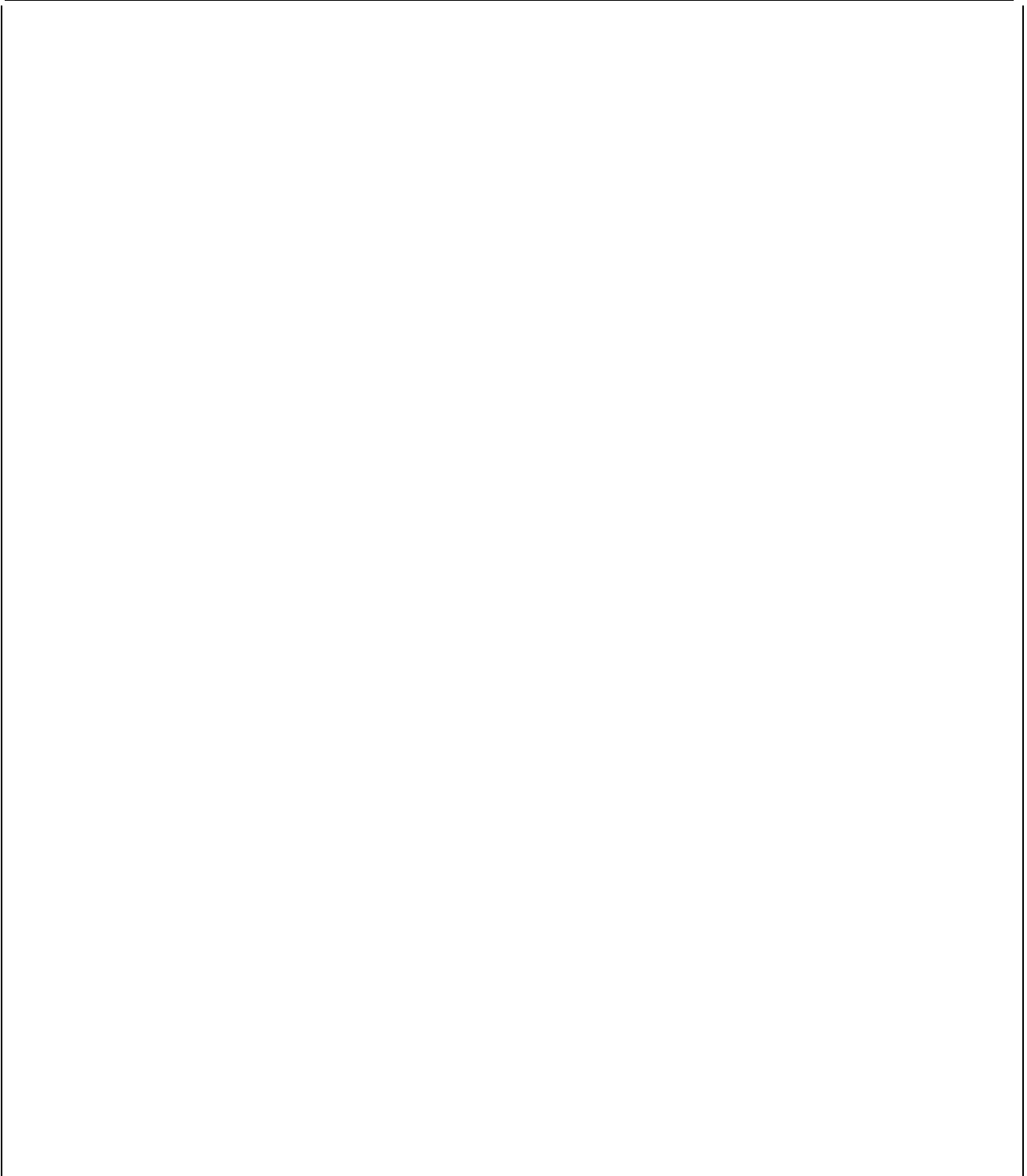
*Abbildung 32: 9.6V-Akku mit Anfangszustand voll und 6°C kalt*



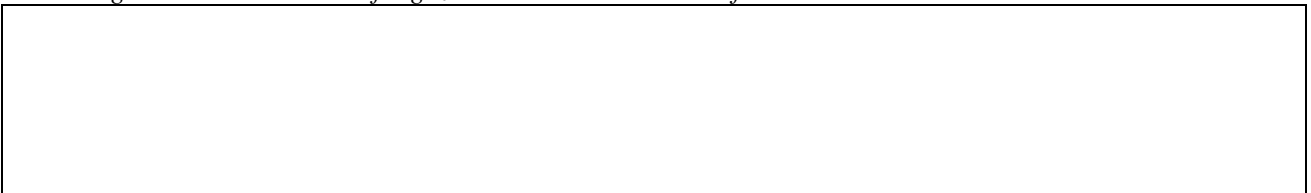


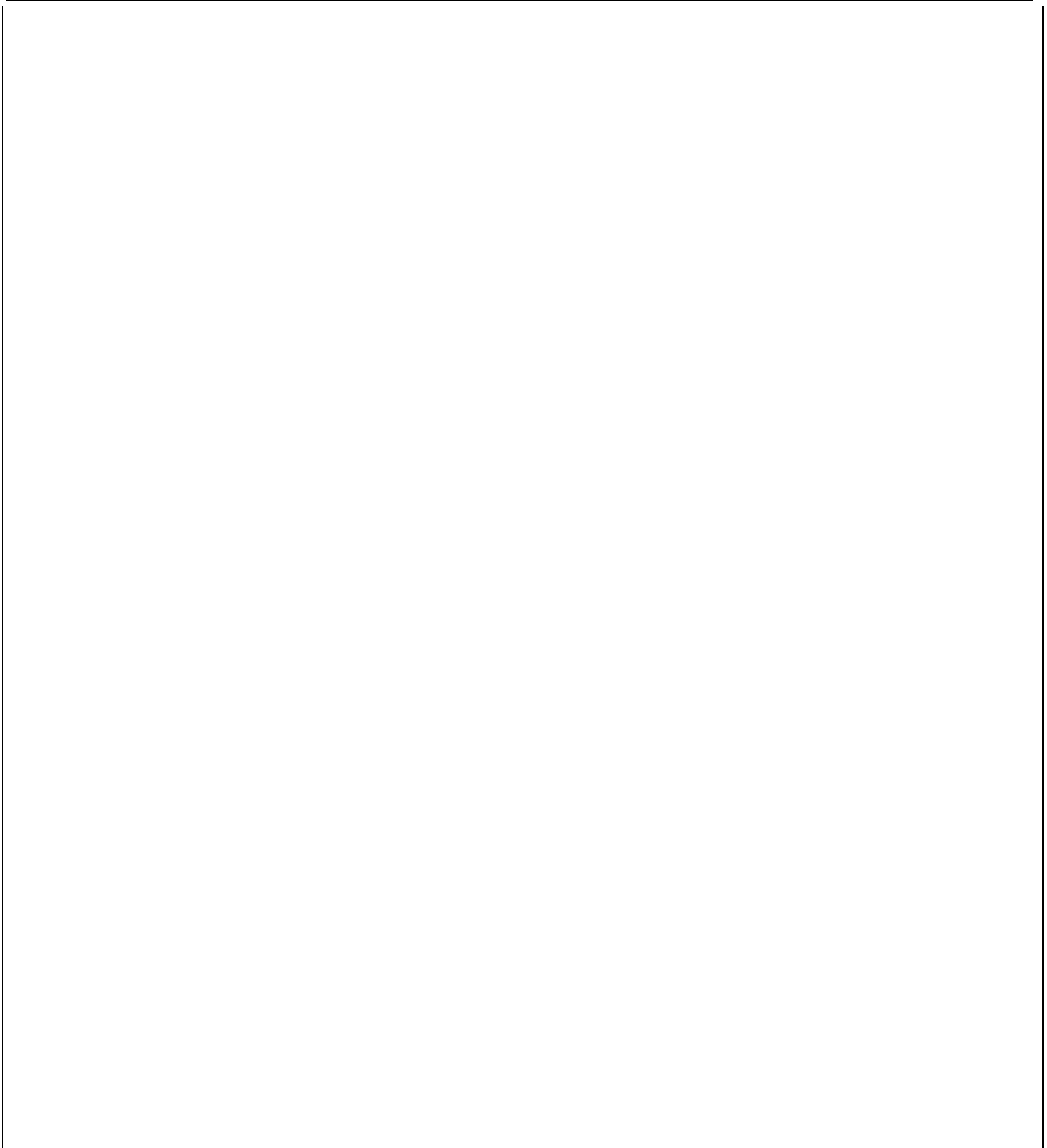
*Abbildung 33: 12V-Akku mit Anfangszustand voll und 36°C warm*





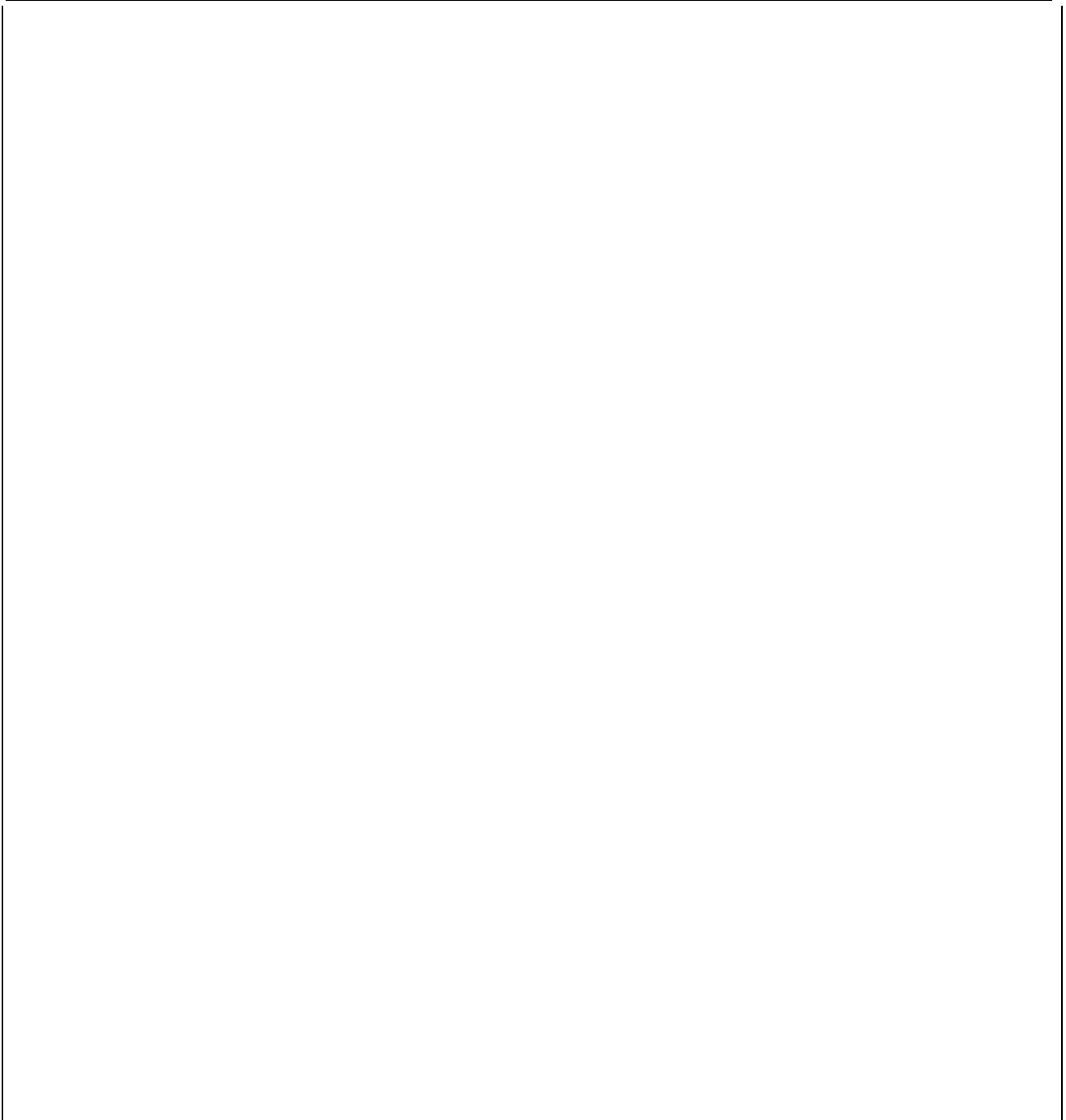
*Abbildung 34: 12V-Akku mit Anfangszustand voll und 64°C heiß*





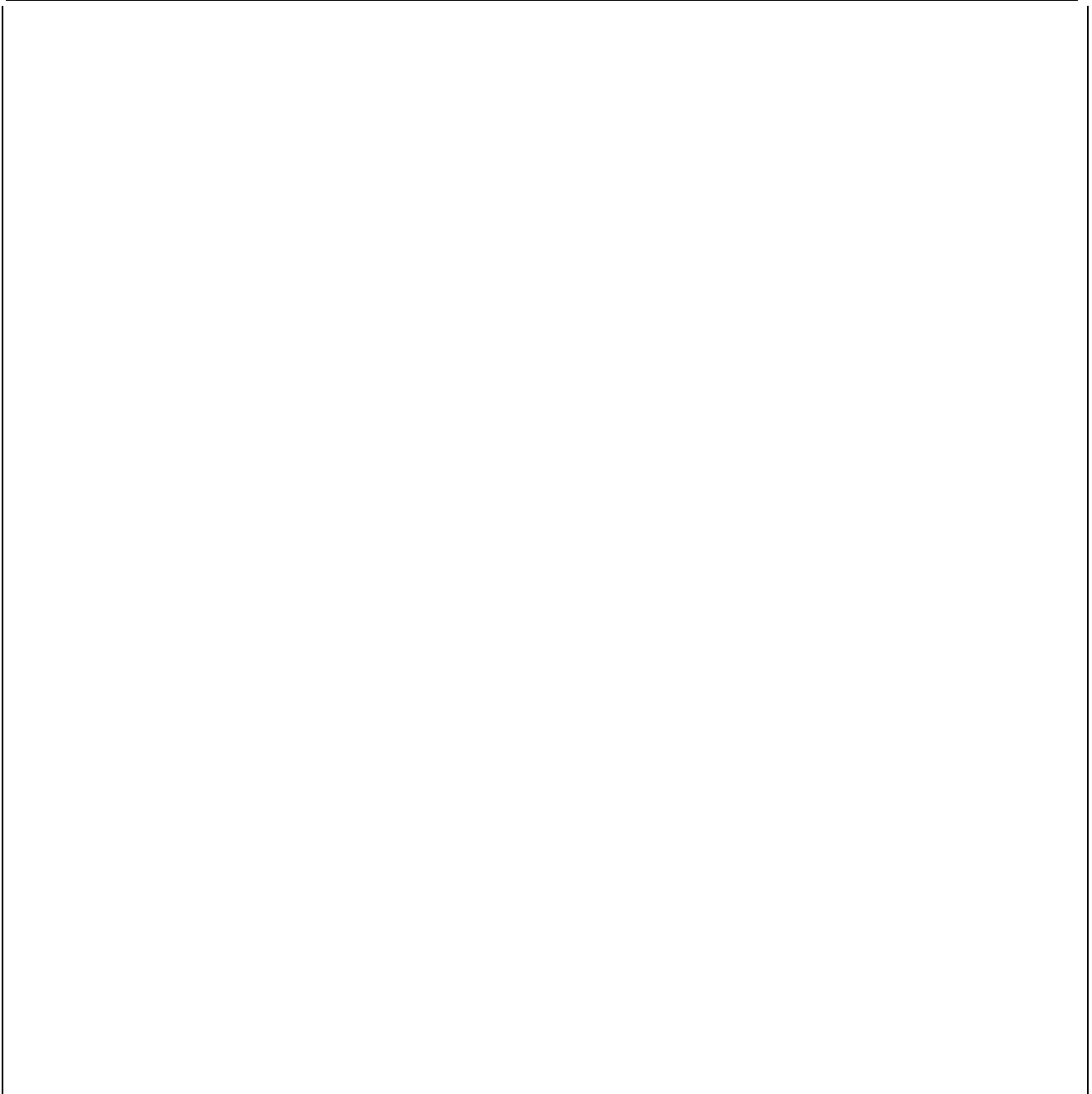
*Abbildung 35: 12V-Akku mit Anfangszustand leer und 2°C kalt*





*Abbildung 36: 12V-Akku mit Anfangszustand leer und 19°C warm*





*Abbildung 37: 12V-Akku mit Anfangszustand leer und 64°C heiß*

Die Vorteile des Fuzzy-Reglers in Verbindung mit der beschriebenen Regelbasis werden am besten im Vergleich mit einem herkömmlichen Ladeverfahren deutlich. Abbildung 38 zeigt die Ladekurve eines leeren Akkus im normalen Temperaturbereich, geladen mit 6 Ampere Konstantstrom und Ladeendeerkennung bei -dU.

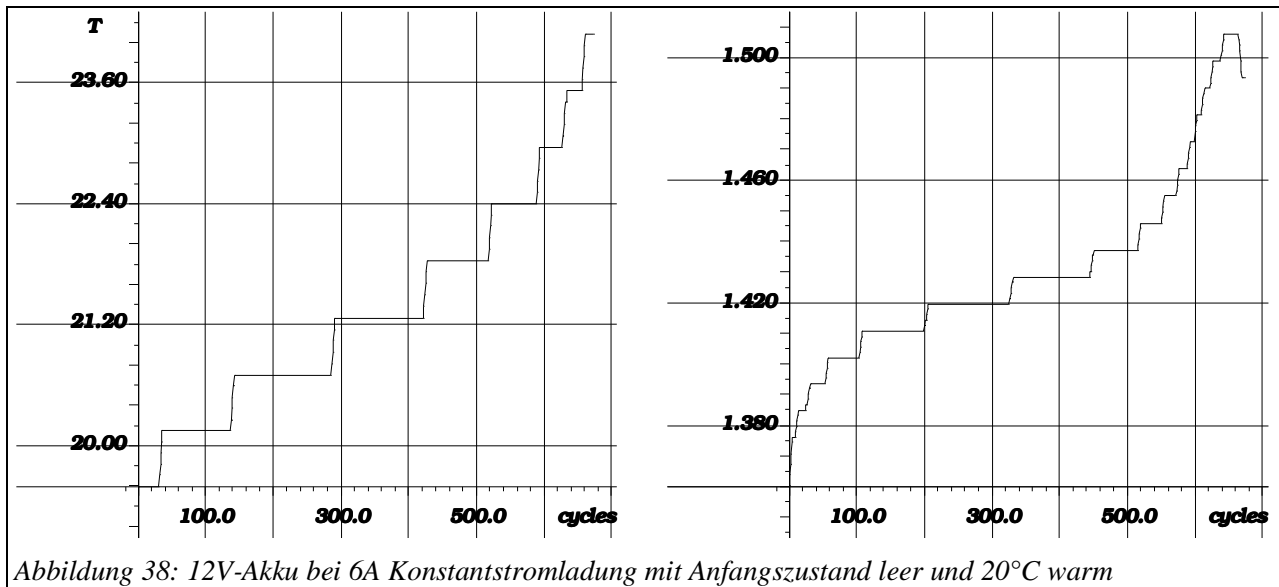


Abbildung 38: 12V-Akku bei 6A Konstantstromladung mit Anfangszustand leer und 20°C warm

Zu erwarten ist eine geringfügig kürzere Ladezeit, aber schlechtere Ladefaktoren und weiterhin eine hohe Beanspruchung der Akkus während des Ladevorganges. Tabelle 3 stellt diese Ladekurve den in den Abbildungen 35 - 37 vorgestellten Fuzzy-Ladekurven gegenüber. In dieser Tabelle werden nur Ladevorgänge mit zu Beginn des Ladevorganges leeren Akkus aufgeführt, da nur in diesen Fällen die Bestimmung des Ladefaktors möglich ist. Stellvertretend für alle durchgeführten Ladeversuche ist für jeden der drei untersuchten Temperaturbereiche eine Fuzzy-Ladekurve aufgeführt, sowie eine Ladekurve mit der oben beschriebenen konventionellen Lademethode aufgelistet.

Die konventionelle Lademethode hat bei Ladevorgängen im normalen Temperaturbereich leichte Vorteile bei der Ladezeit. Der Fuzzy-Regler ist in diesem Temperaturbereich eine Minute langsamer, verbessert aber den Ladefaktor. Die Ladezeiten sind bezogen auf unsere Entwicklungsumgebung (PC) mit einem Meßfenster von 0.45 Sekunden bei 0.6 Ampere. Das große Meßfenster ist aufgrund der kapazitiven Kopplung nötig. Die Mikrocontrollerlösung mit einem Meßfenster von 3 Millisekunden bei 0 Ampere wird eine um ca 29% kürzere Ladezeit haben. In extremen Temperaturbereichen arbeitet der Fuzzy-Regler ebenso schonend wie im normalen Temperaturbereich. Die Ladefaktoren sind hier gut bei natürlich längeren Ladezeit, da mit weniger Strom (schonend) geladen wird. Eine Stromladung mit 6 Ampere würde in diesem extremen Temperaturbereich die Akkus erheblich beanspruchen. Andere Ladeverfahren erlauben deshalb die Ladung in diesem Temperaturbereich nicht. Weiterhin kommt es bei ihnen zur verfrühten Abschaltung bei sehr kalten Akkus infolge möglicher negativer dU-Werte zum Ladebeginn.

Vergleicht man die Temperaturerhöhung, so steht diese scheinbar in einem Widerspruch zur Ladeeffizienz (vergleiche Abbildung 36 und Abbildung 38), denn die konventionelle Methode hat eine geringere Temperaturerhöhung. Nach dem Abschalten des Ladestromsist die Gasrekombination im Akku

Abbildung Nr.	Anfangs-temperatur	Ladezeit in Minuten	Ladefaktor	Lade-effizienz
35	kalt	31.3	1.3 - 1.4	71% - 77%
36	normal	17.9	1.6 - 1.7	59% - 63%
37	heiß	23.5	1.5 - 1.6	63% - 67%
38	normal	16.7	1.7 - 1.8	56% - 59%

*Tabelle 4: Gegenüberstellung: Fuzzy-Regler und konventionelle Lademethode*

nicht sofort beendet. Es kommt auch nach dem Abschalten noch zu einer weiteren Temperaturerhöhung. Bei exponentieller Rücknahme des Stroms gegen Ladeende vermindert sich entsprechend der Stromrücknahme auch der Gasungsvorgang. Weiterhin kann die tatsächlich Temperatur aufgrund der Wärmediffusion nur verzögert gemessen werden. Da die Ladezeit beim mittels Fuzzy-Controller gesteuerten Ladeverfahren aber ein wenig größer ist, scheint auch die Temperaturerhöhung größer zu sein. Nach dem Abschalten müßte die Temperatur weiter gemessen werden, um die Verfahren bezüglich der Temperaturerhöhung zu vergleichen. Dieses ist mit dem Versuchsaufbau aber nicht ohne eine weitere Belastung der Akkus möglich, weshalb darauf verzichtet wurde.



## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Ziel dieses Forschungsberichts war die Entwicklung eines Schnell-Ladeverfahrens für NiCd-Akkumulatoren auf der Basis eines Fuzzy-Controllers. Neben dem wissenschaftlichen Nachweis der Anwendbarkeit eines Fuzzy-Reglers zur Ladekontrolle, war ebenfalls die Entwicklung einer Regelbasis gefordert, die industriellen Anforderungen genügt. Hierbei waren auch die wirtschaftlichen Aspekte der möglichen Serienproduktion eines Fuzzy-Ladegerätes zu berücksichtigen. Die Vorteile des Fuzzy-Ladereglers sind seine universelle Verwendbarkeit bei beliebigen Anfangstemperaturen, auch in extremen Temperaturbereichen in denen herkömmliche Ladeverfahren nicht mehr laden. Weiterhin werden die Akkus sehr schonend in allen Ladezuständen bei verbesserter Ladeeffizienz geladen. Die Regeln des Fuzzy-Controllers lassen sich sehr schnell verstehen, erstellen und verändern, da sie menschlichen Erfahrungsregeln ähnlich sind. Das Fuzzy-Controller gesteuerte Ladeverfahren ist aufgrund der Trennung von Wissen und Programm, kombiniert mit der linguistisch motivierten Modellierungsweise, erheblich wartungsfreundlicher als ein in einem Programm codierter Ladealgorithmus.

Bevor mit der Entwicklung einer geeigneten Experimentierumgebung begonnen werden konnte, mußten die chemischen, physikalischen und elektrischen Eigenschaften der NiCd-Akkus erarbeitet und die derzeit gängigen Ladeverfahren analysiert werden. Auf der Basis dieses Wissens wurde dann eine Entwicklungsumgebung konzipiert, die sowohl die möglichst kurzfristige Einsatzbereitschaft eines Fuzzy-Ladegerätes auf der Basis der bereits vorhandenen Ladegeräte-Hardware Bosch AI 12 berücksichtigt, als auch weiterführende Untersuchungen im Hinblick auf zukünftige Geräte-Generationen mit höheren Ladestromstärken zuläßt. Den größten Teil der Zeit nahmen die Implementierung der Entwicklungsumgebung sowie das Testen verschiedener Regelbasen in Anspruch. Dabei wurden nach und nach nicht nur die Regelbasen verbessert, sondern auch der Fuzzy-Regler um zusätzliche Eigenschaften erweitert.

Als weiteres Ergebnis dieser Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Bosch eine Regelbasis entwickelt, deren Umfang im Vergleich zu den ersten Entwürfen stark reduziert ist. Möglich wurde dies durch die Verwendung einer Mischtechnik aus konventioneller Ladezustandsüberwachung und Überwachung durch den Fuzzy-Controller. Dieses Verfahren ist im Hinblick auf eine Minimierung des Speicherplatzbedarfes notwendig, da in der Serienversion des Fuzzy-Ladegerätes Bosch AI 12 für die Implementierung des Fuzzy-Controllers inklusive seiner Regelbasis nur ein Speicher von 1.8 KByte zur Verfügung steht.

## ANGANG A:

### Hardware

Die Hardware besteht aus zwei unterschiedlichen Konfigurationen. Die eine basiert auf dem Mikrocontroller gesteuerten Ladegerät Bosch AI 12, bei dem lediglich der Mikrocontroller entfernt wurde, die andere Konfiguration stützt sich auf eine bis 15A extern programmierbare Stromquelle der Firma Heinzinger. Die Architektur beider Hardwareumgebungen ist identisch.

Über eine Multi-IO Karte werden die benötigten Meßwerte in einen PC eingelesen, umgerechnet und normiert. Der softwaretechnisch realisierte Fuzzy-Controller soll diese dann auswerten und als Ergebnis den Ladestrom liefern. Dieser wird dann über die Multi-IO-Karte eingestellt. Abbildung 39 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Hardware. Die Karte stellt einen 12 bit DA-Wandler, einen 12 bit 8-Kanal AD-Wandler sowie vier digitale 8 bit Ports zur Verfügung.

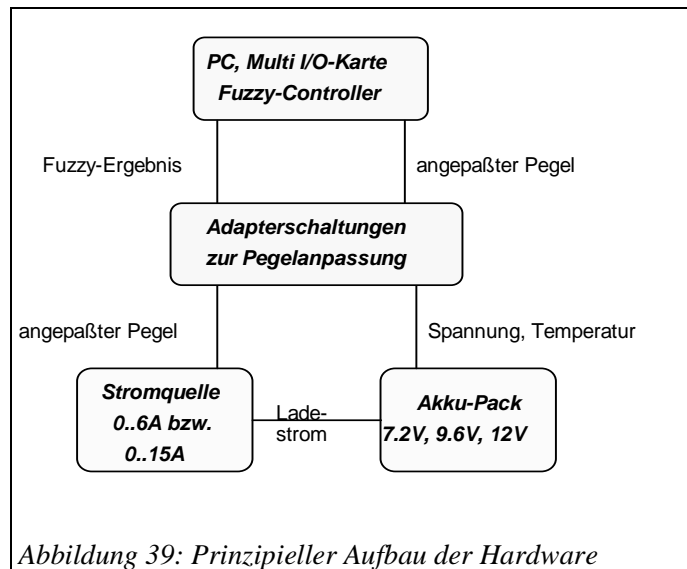


Abbildung 39: Prinzipieller Aufbau der Hardware

Die Beschaltung der Akku-Packs ist in Abbildung 40 dargestellt. Sie kommen mit drei Anschlüssen aus, da der Masseanschluß nicht nur vom Ladestromkreis benutzt wird, sondern auch vom Stromkreis zur Temperaturmessung. Zur Anwendung kommen drei verschiedene Akkutypen:

Typ 1: 10 Zellen, Nennspannung 12 Volt

Typ 2: 8 Zellen, Nennspannung 9.6 Volt

Typ 3: 6 Zellen, Nennspannung 7.2 Volt

Bei allen drei Typen ist der gleiche NTC eingebaut. Der Widerstand des NTC in Abhängigkeit von der Temperatur läßt sich näherungsweise durch folgende Formel beschreiben:

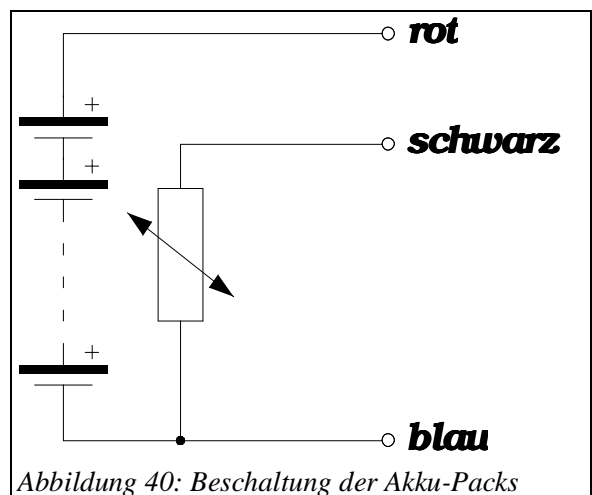


Abbildung 40: Beschaltung der Akku-Packs

Abbildung 42 und 41 zeigen die Verschaltung der einzelnen Hardwarekomponenten. Die Hardware des AL 12 ist im Vergleich zur Hardware-Konfiguration mit Heinzinger-Netzgerät wesentlich einfacher aufgebaut, da sie bereits eine Anpassung aller Meßwerte an die Ein- und Ausgangsspannungen des Mikrocontrollers durchführt. Diese Spannung beträgt 5V für Ein- und Ausgänge. Zur Messung der Akku-Spannung stehen drei Meßbereiche zur Verfügung.

$$R(T) = A * e^{B/T}, T(R) = \frac{B}{\ln(R/A)}$$

T : absolute Temperatur in Kelvin  
 A : Formkonstante  $A = 8.549 * 10^{-3} \Omega$   
 B : Werkstoffkonstante  $B = 4046.8 \text{ K}$

Der erste Meßbereich von 0V bis 10V für die 7.2V Akku-Packs, der zweite Bereich von 0V bis 14.3V für die 9.6V Akku-Packs und der dritte Bereich von 0V bis 20V für die 12V Akku-Packs. Zur Messung der Temperatur steht ein weiterer Meßbereich von 0V bis 5V zur Verfügung. Alle Meßbereiche arbeiten mit 8 BIT Auflösung. der Ladestrom kann allerdings nur über einen 3 BIT DA-Wandler eingestellt werden, so daß nur sieben Stromstufen und der stromlose Zustand zur Verfügung stehen. Abbildung 43 zeigt das Blockschaltbild des Ladegeräts AL 12 FC.

An Stelle des Mikrocontrollers übernimmt der PC mit seinem Fuzzy-Controller die Steuerung des Bosch AI 12, d.h. der Mikrocontroller ist aus dem Ladegerät entfernt und alle wichtigen Signale werden an seiner Fassung abgegriffen bzw. eingespeist. Das geschieht wie auch bei der anderen Hardware-Konfiguration über eine Adapterschaltung zur Pegelanpassung zwischen Multi I/O-Karte und Bosch AI 12. Diese Adapterschaltung übernimmt folgende Pegelanpassungen:

- Meßbereichstransformation der Eingangspegel von 0 bis 5V auf 0 bis 4V für die drei Spannungskanäle und den Temperaturkanal.
- Meßbereichstransformation der Ausgangspegel von 0 bis 4V auf 0 bis 5V des DA-Wandlers des Bosch GAL 12.

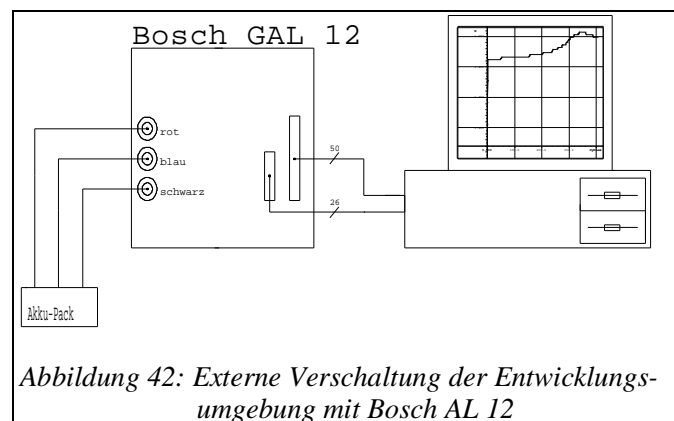


Abbildung 42: Externe Verschaltung der Entwicklungsumgebung mit Bosch AL 12

## Software

Die Implementierung der Software des Entwicklungssystems erfolgte in der Programmiersprache ANSI-C. Sie ist bis auf die Funktionen, welche die Multi I/O-Karte ansprechen, Hardwareunabhängig programmiert. Voruntersuchungen haben ergeben, daß die Geschwindigkeit der Multi I/O-Karte nicht ausreicht, um ein Meßfenster von 5

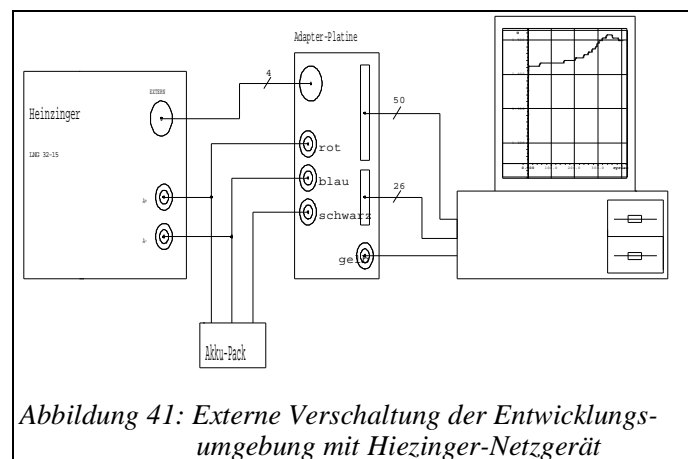


Abbildung 41: Externe Verschaltung der Entwicklungsumgebung mit Heinzinger-Netzgerät

Millisekunden einzuhalten. Deshalb ist bei Ladeexperimenten mit der Bosch Al 12 Hardwarekonfiguration auf kleinster Stromstufe gemessen worden, während bei Verwendung des Heinzinger-Netzgerätes als Stromquelle auch stromlos gemessen worden ist. Der Zeitabstand zwischen zwei Meßzyklen ist zwischen 1 und 5 Sekunden einstellbar. Weitere

Voruntersuchungen haben

gezeigt, daß bei 8 BIT Wandlerauflösung die Meßwerte mindestens 20 Sekunden weit zurückverfolgt werden müssen, um geeignete Daten zur Berechnung der Differenzenquotienten von Akku-Spannung und -Temperatur zu erhalten. Eine Anzahl von Meßwerten mußte daher über einen gewissen Zeitraum in einem Puffer zwischengespeichert werden.

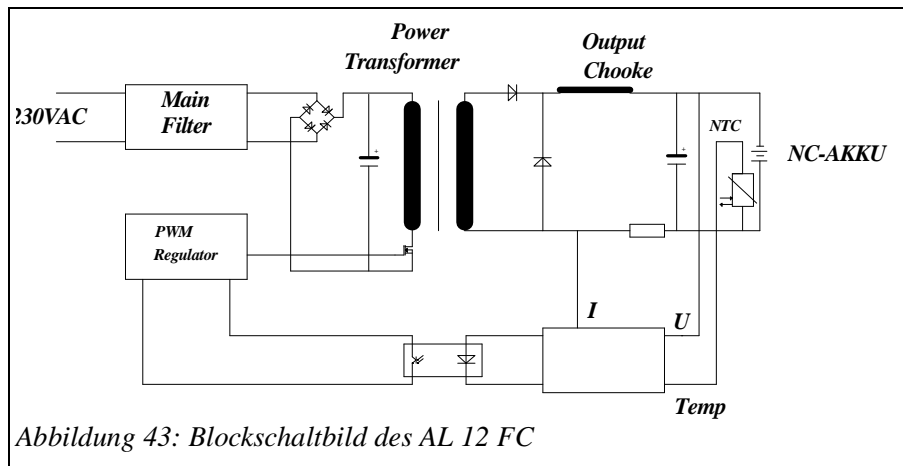


Abbildung 43: Blockschaltbild des AL 12 FC

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] H.-J. Zimmermann, "Fuzzy Sets. Theory - and Its Applications", 2nd Ed., Kluwer-Nijhoff Publishing, 1990.
- [2] B. Kosko: "Neural Networks and Fuzzy Systems", Englewood Cliffs NJ: Prentice Hall, 1991.
- [3] L.A. Zadeh: "Fuzzy sets", Information and Control, vol.8, S.338-353,1965.
- [4] L.A. Zadeh: "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, Vol.SMC-3, No.1, S.28-44, Jan. 1973.
- [5] W.J.M. Kickert, E.H. Mamdani:" Analysis of a fuzzy logic controller", Fuzzy Sets and Systems 1, S.29-44, 1978.
- [6] P.J. King, E.H. Mamdani: "The application of fuzzy control systems to industrial processes", Automatica Vol. 13, S.235-242, 1977.
- [7] A. Kandel, S. C. Lee: "Fuzzy Switching and Automata: Theory and Applications", Crane Russak, New York, 1979.
- [8] H. Bandemer, S. Gottwald: "Einführung in Fuzzy-Methoden", Harri Deutsch Verlag, Frankfurt am Main,1990.
- [9] H. Thiele, M.Kulaš: "Mehrwertige Logik, Fuzzy-Logik und Approximatives Schließen", Vorlesung Universität Dortmund, Fachbereich Informatik, 1992.
- [10] H. Frank: "Fuzzy Mengen, Fuzzy-Logik und ihre Anwendungen", Vorlesung Universität Dortmund, Fachbereich Mathematik, 1991.
- [11] L. Lukasiewicz, A. Tarski: "Untersuchungen über den Aussagenkalkül", C.R. Socp. Lett. Varsovie 23, 30-50, 1930.
- [12] Togai InfraLogic Fuzzy-C Development System User's Manual.
- [13] D. Dubois, H. Prade: "Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications", Mathematics in Science and Engineering, Vol. 144, Academic Press INC., Boston, 1980.
- [14] M.M. Gupta, J. Qi: "Design of fuzzy logic controllers based on generalized T-operators", Fuzzy Sets and Systems 40, S.473-489, 1991.
- [15] E. Czogala, W. Pedrycz: "On the concept of fuzzy probalistic controllers", Fuzzy Sets and Systems 10, S.109-121, 1983.

- [16] H. Watanabe, W.D. Dettloff, K. Yount: "A VLSI fuzzy logic controller with reconfigurable, cascable architecture", IEEE Journal of solid state circuits, Vol.25, No.2, S.376-382, 1990.
- [17] H. Kindl: "Fuzzy Logic und Fuzzy Control", Vortrag Zedo-Workshop Neue Informationsverarbeitungstechnologien für die elektrische Energieversorgung, 6.92.
- [18] M. Brae, D.A. Rutherford: "Selection of parameters for a fuzzy logic controller", Fuzzy Sets and Systems 2, S.185-199, 1979.
- [19] R.M. Tong: "A retrospective view of fuzzy control systems", Fuzzy Sets and Systems 14, S.199-210, 1984.
- [20] W. Eppler: "Prestructuring of neural networks with fuzzy rules", Proceedings of Neuro-Nimes '90, Nimes, Nov. 1990.
- [21] C.T. Lin, C.S.G. Lee: "Neural networks based fuzzy logic control and decision systems", IEEE Transactions on computers, Vol. 40, pp. 1320-1336,12/91.
- [22] P.Y. Glorennec: "A Neuro-Fuzzy Controller with variable geometry", Proceedings of FUZZ-IEEE '92, San Diego, 8-12.392.
- [23] H. Surmann, B. Möller, K. Goser: "A distributed self-organized fuzzy rule based system", Neuro-Nimes '92, Nimes, Nov. 1992.
- [24] C. Karr: "Genetic algorithms for fuzzy controllers", AI Expert, vol. 6, pp.26-33, 1991
- [25] M. Sugeno: "Industrial Applications of Fuzzy Control", North-Holland, sec. impression, 1992.
- [26] S. Shao: "Fuzzy self-organizing controller and its applications for dynamic processes", Fuzzy Sets and Systems 26, S.151-164, 1988.
- [27] Yung-Yaw Chen: "Stability Analysis of Fuzzy Control -- A Lyapunov Approach IEEE CH2501-1/87/0000-1027, 1987.
- [28] H. Surmann, K. Grönke, K.Heesche: "Programm zur Bearbeitung von Fuzzy-Controllern", Lehrstuhl Bauelemente der Elektrotechnik, Universität Dortmund, 1991.
- [29] T. Yamakawa: "Stabilization of an inverted pendulum by a high-speed fuzzy logic controller hardware system", Fuzzy Sets and Systems 32, S. 161-180, 1989.
- [30] K. Goser, U. Rückert, K. Schumacher, A. Ungering, C. Heite, H. Surmann: "Hardware für Fuzzy-Controller", 1. Dortmunder Fuzzy-Tag, 1991.
- [31] H. Surmann, A. Ungering, K. Goser: "Fuzzy-Controller mit VLSI-Pipeline Architektur für hohe Datenraten", ITG-Fachtagung, Stuttgart, 3/92.
- [32] H. Surmann, Th. Tauber, A. Ungering, K. Goser: "Architecture of a Fuzzy Controller based on Field Programmable Gate Arrays", 2<sup>nd</sup> international Workshop on Field-Programmable Logic and Applications, Wien, 31.8 - 2.9.1992.
- [33] H. Surmann, C. Heite, K. Schumacher, K. Goser: "Fuzzy Logic und fuzzy Schaltungen", Seminar am Lehrstuhl Bauelemente der Elektrotechnik, Universität Dortmund, 1991.

- [34] K. Goser, H. Surmann: "Mit Faustformeln regeln. Fuzzy-Controller: Clevere Regler schnell entworfen.", Elektronik März 1992.
- [35] CADNICA, Sanyo Electric Co.,Ltd. 1989
- [36] L Retzbach: "Akkus und Ladegeräte", Neckar-Verlag, Villingen-Schwenningen 1985
- [37] B. J. R. Hodge, R. Bonnaterre, F. Putois: "Fast charging of sealed Nickel-Cadmium Batteries: Theory and practice", Power Sources 5, Sept. 1974
- [38] NiCd-Akkus schnell geladen, Elektor Dezember 1979
- [39] NC-Akkus, Tragbarer Strom aus der Steckdose, Elektor März 1979
- [40] E. Kerre: "Introduction to the Basic Principles of Fuzzy Set Theory and some of its Applications", Communication & Cognition, Belgium, 1991.
- [41] C. V. Negoita: "Expert Systems and Fuzzy Systems", Benjamin/Cummings Publishing, California, 1985.
- [42] B. Ya. Rosenshtok, E. V. Pugachev, L. V. Kozelkov: "Dynamic model of an accumulator power source as an object for automatic control", Soviet Electrical Engineering, Vol.: 60, Iss.: 9, S. 19-26, 1989.
- [43] P.E. Panneton, J.R. Meyer: "Results of deep DOD life cycle tests at high rates on 12 Ah cells", Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Vol.: 6, S. 100-104, 1990.
- [44] R. Kaiser, W. Roth, M. Stoll: "Performance of photovoltaic supplied systems with NiCd battery storage", Proceedings of the International Photovoltaic Solar Energy Conference, S. 221-224, 1989.
- [45] J. Meiwes, D. Nowak: "A state-of-charge indicator for experimental nickel-cadmium batteries", Electric Vehicle Developments, Vol.: 8, Iss.: 3, S. 96-104, July 1989.