

GEGENÜBERSTELLUNG VON ANALYSE DURCH SYNTHESE UND RÜCKWÄRTSPRÄDIKTION

Norbert Görtz

Lehrstuhl für Netzwerk- und Systemtheorie, Christian-Albrechts-Universität Kiel

Kaiserstraße 2, D-24143 Kiel

Tel.: +49 431 77572-406, Fax.: -403, ng@techfak.uni-kiel.de

Abstract: Bei vielen Sprachcodierverfahren verwendet man lineare Prädiktoren, um das Sprachsignal am Coder-Eingang in seiner Dynamik zu reduzieren und damit eine Quantisierung und Übertragung mit kleiner Bitrate bei hoher Sprachqualität zu ermöglichen. Linear prädiktive Codierverfahren werden heute z.B. in den GSM-Mobilfunknetzen und beim DECT-Standard (digitale Schnurlostelefone) eingesetzt.

Es ist bekannt [3], daß der Prädiktionsgewinn im Sinne der "Rate-Distorsion"-Theorie nur dann zur Verringerung der Bitrate bei unveränderter Qualität eingesetzt werden kann, wenn man den Prädiktor so plaziert, daß im Codierer der im *decodierten* Sprachsignal resultierende Fehler als Fehlermaß bei der Quantisierung verwendet wird. Dies ist bei den sogenannten "Analyse-durch-Synthese"-Systemen und bei rückwärtsprädiktiven Systemen der Fall.

In Kapitel 1 wird zunächst mit Hilfe elementarer Blockschaltbild-Operationen für lineare Systeme gezeigt, daß die Analyse durch Synthese und die Rückwärtsprädiktion äquivalent sind [4]. Dies gilt sowohl bei Verwendung der skalaren Quantisierung als auch bei Vektorquantisierung des LPC-Restsignals und auch bei beliebig grober Quantisierung. In Kapitel 2 wird die alternative rückwärtsprädiktive Struktur mit "Rückführung des Quantisierungsfehlers" mit Hilfe von Blockschaltbild-Operationen in die herkömmliche rückwärtsprädiktive Struktur aus Kapitel 1 überführt. Die alternative rückwärtsprädiktive Struktur ist somit ebenfalls der Analyse durch Synthese gleichwertig. Auch diese Äquivalenz gilt unabhängig von Art und Grobheit der Quantisierung.

1. ÜBERGANG VON DER ANALYSE DURCH SYNTHESE AUF RÜCKWÄRTSPRÄDIKTION

Die folgenden Blockbilder zeigen schrittweise den Übergang von der Analyse durch Synthese (AdS) auf die rückwärtsprädiktive Grundstruktur. Zur Vereinfachung wird ein System ohne explizite Langzeit-Prädiktion verwendet, die Ergebnisse können aber auf Systeme mit separaten Langzeitprädiktoren übertragen werden. Es wird ein Prädiktor mit der Übertragungsfunktion

$$P_a(z) = \sum_{i=1}^{N_p} a_i z^{-i} \quad (1)$$

gewählt, wobei keine Festlegungen hinsichtlich des Filtergrades N_p getroffen werden. Es wird davon ausgegangen, daß die Filterkoeffizienten a_i mit Hilfe eines geeigneten Analyseverfahrens [2] blockweise auf das Eingangssignal angepaßt werden. Die Filteroperationen sind dann innerhalb der Blöcke linear, an den Blockgrenzen muß aber auf eine korrekte Behandlung der Filterzustände geachtet werden. Die Verwendung eines adaptiven (und damit im Ganzen nicht-linearen) Filters ist für die praktische Anwendung erforderlich (instationäre Signale); sie ist aber nicht notwendig und wirkt aber auch nicht einschränkend für die nachfolgenden Untersuchungen.

Weiterhin wird allgemein davon ausgegangen, daß bei der Quantisierung des Restsignals eine Vektorquantisierung verwendet wird. Deshalb wurden die Signal-Größen in den Abbildungen unterstrichen.

Die Quantisierung ist dargestellt als Suche des Eintrages (Codevektors) im Codebuch C mit der Nummer J , der das Abstandsmaß D_j minimiert, d.h. $D_J \leq D_j, \forall j \in \{0, 1, \dots, 2^{N_B} - 1\}$. Dabei ist N_B die Zahl der Bits, die zur Quantisierung verwendet werden, und $N_C = 2^{N_B}$ ist die Zahl der Codebucheinträge.

Bezüglich des Abstandsmaßes wird nichts vorausgesetzt, außer daß es eine Funktion des Fehlersignals $e_j(k) = \underline{s}(k) - \underline{\tilde{s}}(k)$ ist, d.h. die folgenden Betrachtungen gelten u.a. für den häufig verwendeten mittleren quadratischen Fehler und "gewichtete" Varianten davon.

In Abbildung 1 ist zunächst eine Analyse-durch-Synthese-Struktur dargestellt. In den fol-

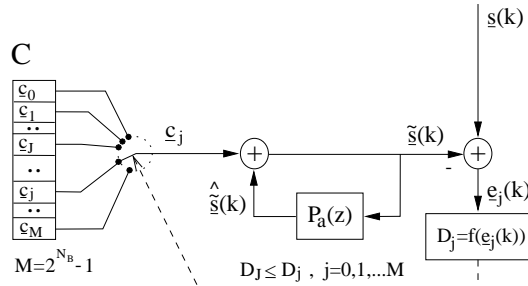


Abbildung 1: Analyse-durch-Synthese-System

genden Abbildungen 2 - 5 ist schrittweise der Übergang auf eine rückwärtsprädiktive Struktur (Abbildung 5) gezeigt. Die Größe $\hat{\underline{\tilde{s}}}(k)$ bezeichnet in den Abbildungen einen Vektor von Schätzwerten, welche aufgrund bereits quantisierter Komponenten der Vektoren $\underline{\tilde{s}}(k-1)$ und $\underline{\tilde{s}}(k)$ berechnet werden. Nur bei Verwendung einer Vektorquantisierung werden für die Quantisierungsentscheidung zum aktuellen Zeitpunkt quantisierte Werte (Komponenten von $\underline{\tilde{s}}(k)$) benötigt, welche selbst von dieser Quantisierungsentscheidung abhängen. Dieser Umstand erfordert die Berechnung des Decoderausgangssignals im Coder für jeden möglichen Codevektor, was den Rechenaufwand der AdS mit Vektorquantisierung gegenüber einer skalaren Quantisierung beträchtlich erhöht.

In Abbildung 2 werden im ersten Schritt zwei Prädiktoren ergänzt, deren Ausgangssignale mit unterschiedlichen Vorzeichen an der gleichen Stelle zum Signal $\underline{\tilde{s}}(k)$ hinzuaddiert werden, d.h. beide neuen Anteile kompensieren sich. In der Darstellung in Abbildung 2 ist die Addition bereits mit dem Summationspunkt zur Fehlerberechnung (algorithmisch äquivalent) vertauscht. In der praktischen Realisierung ist für jeden Prädiktor ein eigenes Filtergedächtnis mit der zugehörigen "State"-Verwaltung vorzusehen.

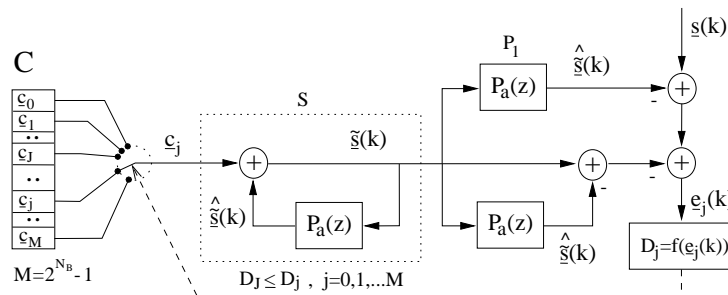


Abbildung 2: Übergang von der Analyse durch Synthese auf Rückwärtsprädiktion: 1. Schritt

Danach wird das System so erweitert, daß das Eingangssignal des oberen Zweiges in Abbildung 2 vor dem Synthesefilter S abgegriffen werden kann, d.h. die Synthesefilterung muß nun ebenfalls getrennt im oberen Zweig erfolgen. Dies zeigt Abbildung 3. Man erkennt, daß sich im unteren Signalzweig das Synthesefilter und das LPC-Analysefilter zu einem "Durchgang"

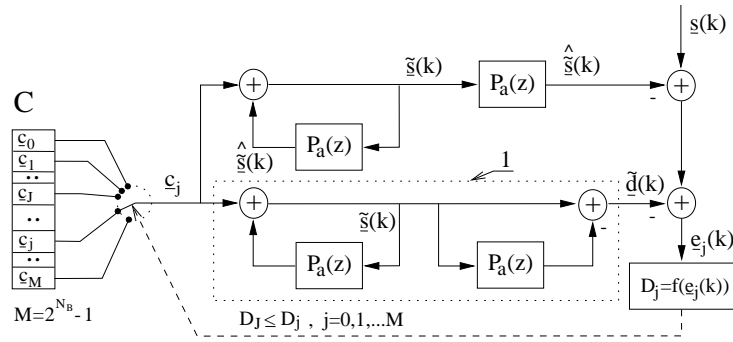


Abbildung 3: Übergang von der Analyse durch Synthese auf Rückwärtsprädiktion: 2. Schritt

vereinigen lassen, denn

$$\tilde{\underline{S}}(z) = \frac{\underline{C}_j(z)}{1 - P_a(z)}, \quad (2)$$

und damit folgt

$$\tilde{\underline{D}}(z) = \tilde{\underline{S}}(z)(1 - P_a(z)) = \underline{C}_j(z). \quad (3)$$

Der Vektor $\hat{\underline{s}}(k)$ im oberen Zweig in Abbildung 3 kann auch im vorgeschalteten Synthesefilter abgegriffen werden. Dies zeigt Abbildung 4, die der bekannten rückwärtsprädiktiven Systemstruktur in Abbildung 5 entspricht. Dort ist auch die “übliche” Darstellung angegeben, bei der die Quantisierung als Addition des Rauschsignals $\underline{n}(k)$ (hier ein Vektor) modelliert wird.

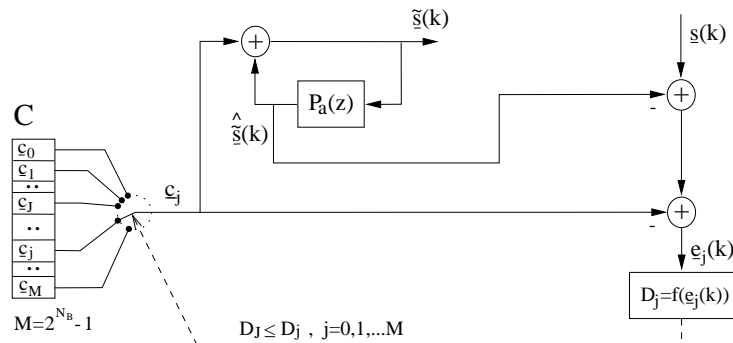


Abbildung 4: Übergang von der Analyse durch Synthese auf Rückwärtsprädiktion: 3. Schritt

1.1. Bemerkungen:

Die oben gezeigte Äquivalenz von Rückwärtsprädiktion und Analyse durch Synthese gilt auch bei beliebig grober Quantisierung, denn bei den Umformungen der “Blockschaltbilder” wurde nirgends eine ausreichend feine Quantisierung vorausgesetzt.

Bei Anwendung der Vektorquantisierung muß auch in der rückwärtsprädiktiven Struktur nach Abbildung 5 für jeden bei der Quantisierung “getesteten” Eintrag des Codebuches C eine explizite Filterung des getesteten Vektors $\underline{c}_j(k)$ erfolgen. Im Gegensatz dazu kann bei skalarer Quantisierung der Wert $\hat{s}(k)$ einmal, vor der Quantisierung, berechnet werden, weil dieser Wert nicht von der aktuell zu treffenden Quantisierungsentscheidung beeinflusst wird. Dementsprechend erfordert auch die Rückwärtsprädiktion den von der Analyse durch Synthese bekannten hohen Rechenaufwand, wenn eine Vektorquantisierung des Restsignals erfolgt.

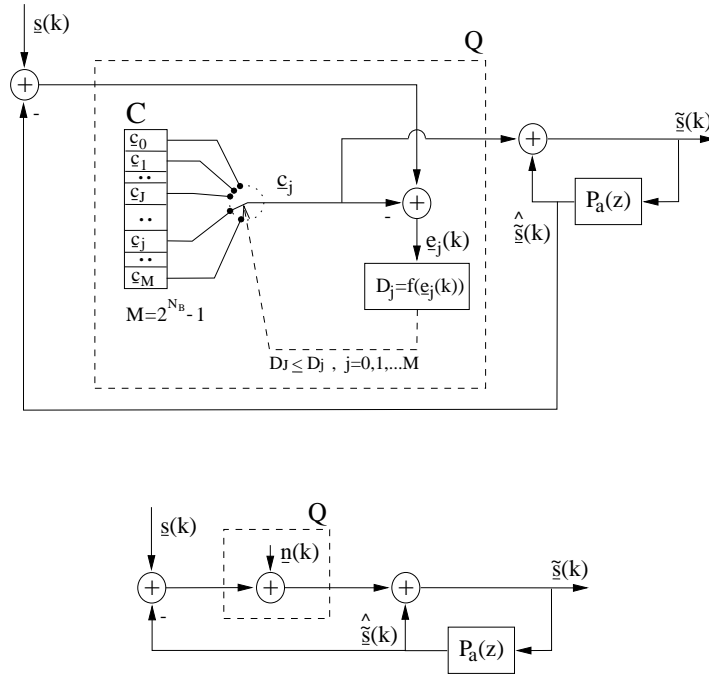


Abbildung 5: Rückwärtsprädiktion

Wenn eine “Gain-Shape”-Vektorquantisierung (GS-VQ) verwendet wird, dann bleiben die Verhältnisse im Prinzip unverändert. Abbildung 6 zeigt eine entsprechend erweiterte Analyse-durch-Synthese-Struktur. Der Verstärkungsfaktor γ wird vor der “Umrechnung” in die rückwärtsprädiktive Struktur hinter das Synthesefilter verschoben, wie dies auch (bei Verwendung der GS-VQ) zur Ermittlung der optimalen “Wellenform” in AdS-Systemen üblich ist [1]. Nach Durchführung der oben beschriebenen Schritte (vgl. Abbildungen 2 - 4) ergibt sich

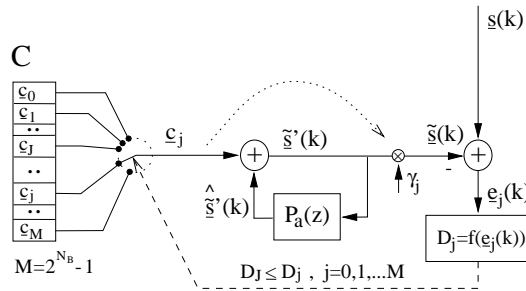


Abbildung 6: Analyse-durch-Synthese-System mit “Gain-Shape”-Vektorquantisierung

die Struktur nach Abbildung 7. Es stellt sich die Frage, wie in der praktischen Durchführung der Verstärkungsfaktor γ für jeden Codebucheintrag optimal gewählt werden kann: Das Abstandsmaß lautet in allgemeiner Form:

$$\begin{aligned}
 D_j &= f\left(\overbrace{\underline{s}(k) - \gamma \underline{\hat{s}}'(k) - \gamma \underline{c}_j(k)}^{\underline{e}(k)}\right) \\
 &= f\left(\underline{s}(k) - \gamma \underbrace{(\underline{\hat{s}}'(k) + \underline{c}_j(k))}_{\underline{\hat{s}}'(k)}\right). \tag{4}
 \end{aligned}$$

Der Vektor $\underline{\hat{s}}'(k)$ kann mit Hilfe der LPC-Koeffizienten aus dem getesteten Codevektor $\underline{c}_j(k)$

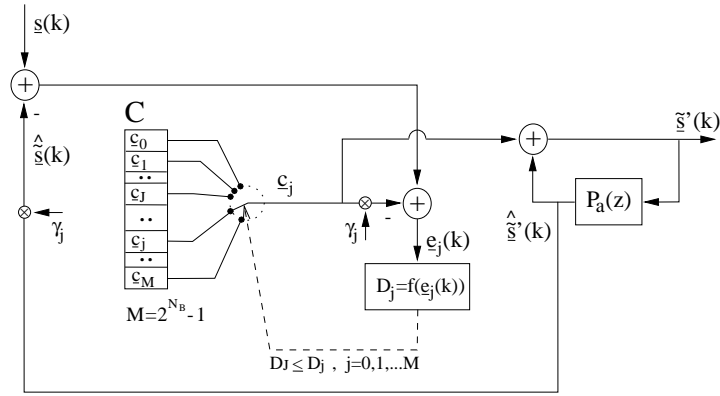


Abbildung 7: Rückwärtsprädiktives System mit "Gain-Shape"-Vektorquantisierung

bestimmt werden. Das Abstandsmaß D_j kann nach γ differenziert und γ kann so gewählt werden, daß D_j für den Codebucheintrag seinen minimalen Wert annimmt.

2. RÜCKWÄRTSPRÄDIKTION IN ALTERNATIVER STRUKTUR

Häufig wird bei der Rückwärtsprädiktion eine Struktur wie in Abbildung 8 verwendet (Möglichkeit zur Rauschfärbung durch Variation Filterfrequenzgangs, mit dem der Quantisierungsfehler $n(k)$ vor der Rückführung auf den Eingang gewichtet wird, siehe [3]). In den Abbildungen

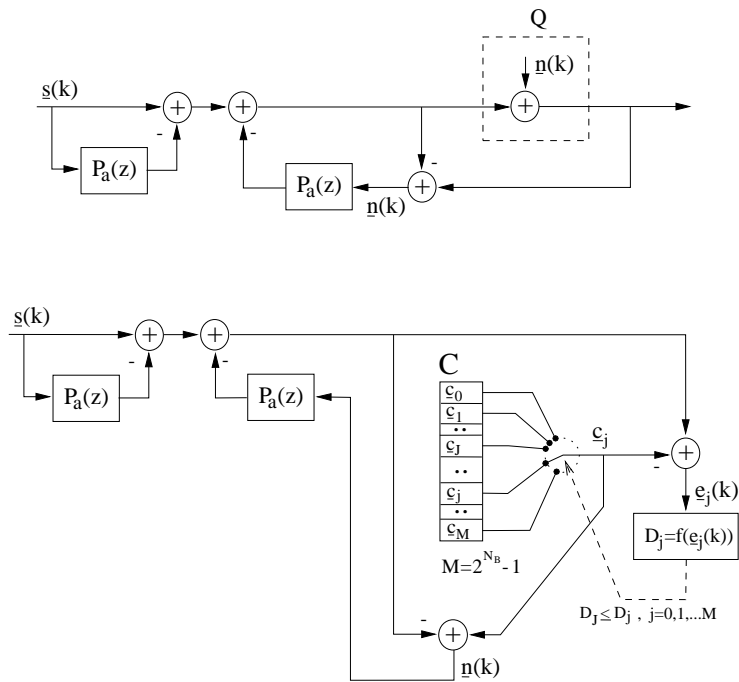


Abbildung 8: Alternative rückwärtsprädiktive Struktur

9 - 13 ist mit Hilfe elementarer Blockschaltbild-Operationen schrittweise gezeigt, daß die alternative rückwärtsprädiktive Struktur der aus Abbildung 5 algorithmisch äquivalent ist und damit, wegen der Ergebnisse aus Kapitel 1, auch der AdS-Struktur aus Abbildung 1. Auch hierbei werden keine Beschränkungen hinsichtlich der Quantisierung (wie z.B. "ausreichend fein") vorausgesetzt.

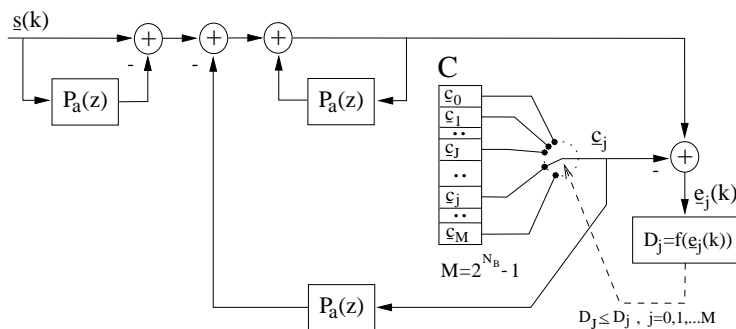


Abbildung 9: Übergang von der alternativen auf die rückwärtsprädiktive Struktur in Abbildung 5: 1. Schritt

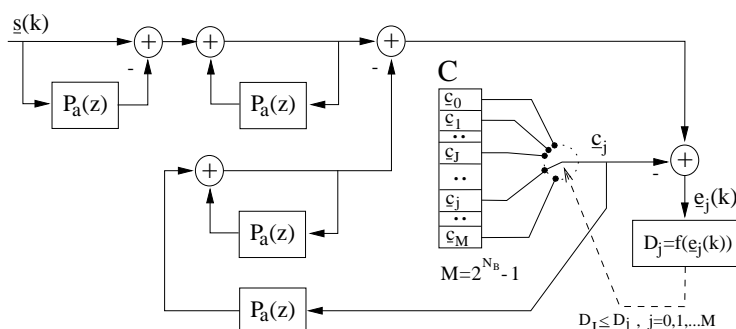


Abbildung 10: Übergang von der alternativen auf die rückwärtsprädiktive Struktur in Abbildung 5: 2. Schritt

3. SIMULATIONEN

Zum Vergleich der Verfahren wurde eine sehr einfache Simulation unter den folgenden Bedingungen durchgeführt:

Es wurde ein Schmalband-Sprachsignal codiert ohne Verwendung einer Langzeit-Prädiktion und unter Anwendung einer LPC-Analyse der Ordnung $N_p = 10$. Die Adaption der LPC-Prädiktoren mit der Übertragungsfunktion $P_a(z)$ erfolgte alle 160 Abtastwerte (20 ms).

Das Restsignal wurde gleichförmig skalar quantisiert mit $N_C = 4$ Stufen und einer Maximalaussteuerung von ± 1.5 , d.h. $C = \{-1.5, -0.5, 0.5, 1.5\}$. Die Codebuch-Abtastwerte wurden vorab mit der Standardabweichung des LPC-Restsignals des Sprachsignals (berechnet mit einem Koeffizientensatz für die ganze Sprachprobe) skaliert. Dadurch lagen sie zur Quantisierung des Restsignals in der richtigen Größenordnung. Für die nachfolgend durchgeführten Vergleiche

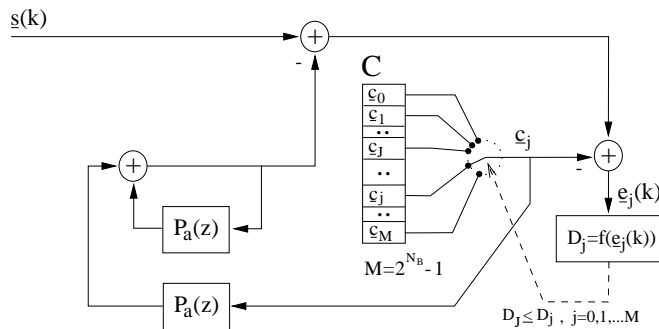


Abbildung 11: Übergang von der alternativen auf die rückwärtsprädiktive Struktur in Abbildung 5: 3. Schritt

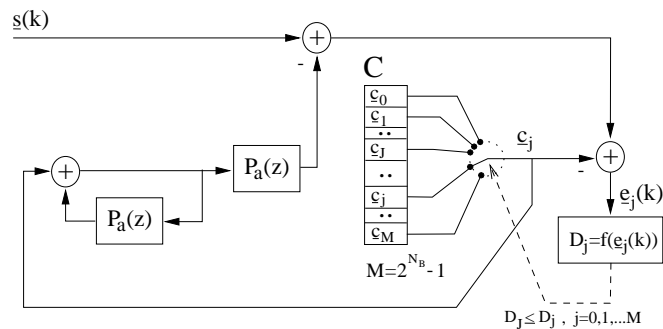


Abbildung 12: Übergang von der alternativen auf die rückwärtsprädiktive Struktur in Abbildung 5: 4. Schritt

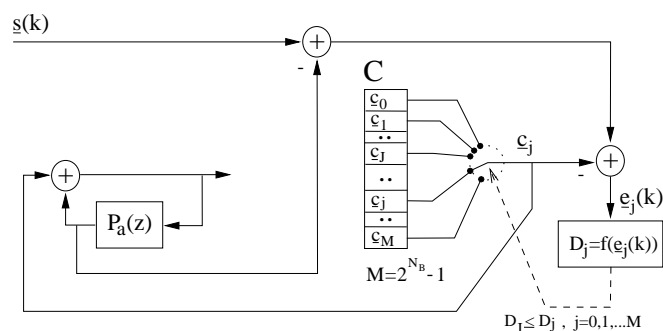


Abbildung 13: Übergang von der alternativen auf die rückwärtsprädiktive Struktur in Abbildung 5: 5. Schritt

verschiedener Systemstrukturen bei Verwendung des *gleichen* Codebuches C sind die Details der Codebuchauswahl unwichtig.

Man erkennt in Abbildung 14, daß bei grober Quantisierung mit nur 2 Bit pro Abtastwert ($N_C = 4$ Codevektoren) relativ starke Abweichungen vom Originalsignal bei Verwendung der Analyse durch Synthese auftreten (Fehlersignal im unteren Bild). In Abbildung 15 (oben) ist das Fehlersignal des rückwärtsprädiktiven Systems in seiner Grundstruktur nach Abbildung 5 dargestellt. Es ist im Rahmen der Rechengenauigkeit gleich dem Fehlersignal des Analyse-durch-Synthese-Systems, d.h. die Ausgangssignale beider Systeme sind identisch. In Abbildung 15 (unten) ist das Fehlersignal des rückwärtsprädiktiven Systems in alternativer Struktur nach Abbildung 8 dargestellt. Auch dieses Signal ist gleich dem Fehlersignal des AdS-Systems, d.h. das AdS-System und beide rückwärtsprädiktiven Systeme liefern exakt die gleichen Ausgangssignale.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde gezeigt, daß theoretisch und in der praktischen Realisierung die Ausgangssignale von Systemen in rückwärtsprädiktiver und in Analyse-durch-Synthese-Struktur gleich sind. Die Analyse-durch-Synthese-Struktur kann durch elementare Blockschaltbild-Operationen in beide rückwärtsprädiktiven Systemstrukturen “umgerechnet” werden, d.h. beide Systemtypen sind äquivalent.

Die rückwärtsprädiktive Systemstruktur wird meist bei skalarer Quantisierung gewählt, die Analyse-durch-Synthese-Struktur dagegen bei Systemen mit Vektorquantisierung, weil letztere in einem rückwärtsprädiktiven System schwieriger zu durchschauen ist.