

KAPITEL 5

Kalibration kennlinienbasierter Sensorsysteme

5.1 Automatisierte Kalibration

Damit man anhand des Ausgangssignals eines Meßwertumformers eine zuverlässige Aussage über die aktuell anliegende Meßgröße erhält, muß der Meßwertumformer nach seiner Herstellung einer sogenannten Kalibration seiner Sensorparameter bzgl. Nullpunkt und Endwert unterzogen werden. Im Rahmen dieser Kalibration müssen zudem eventuell vorhandene Querempfindlichkeiten beispielsweise gegenüber der Temperatur beseitigt werden, damit das Ausgangssignal von diesen Störgrößen nicht unnötig verfälscht wird. Sofern all diese Einstellungen während der Kalibration manuell erfolgen, nehmen sie viel Zeit- und Personalkapazität in Anspruch, wodurch sich die Produktionskosten überproportional mit der geforderten Gesamtgenauigkeit der Meßwertumformer erhöhen. Um diesen Beitrag zu den Produktionskosten zu minimieren, steht in diesem Kapitel die Entwicklung einer effizienten Kalibrationshard- und software sowie den dazugehörigen Kalibrationsstrategien im Vordergrund. Gegenstand dieses Kapitels ist demzufolge ein Kalibrationsmeßplatz für eine automatisierte Bestimmung der notwendigen Sensorparameter. Aus dem Gesichtspunkt einer industriellen Serienfertigung muß der Kalibrationsmeßplatz in der Lage sein eine größere Anzahl von Meßwertumformern innerhalb eines laufenden Kalibrationsprozesses mit minimaler Zeit abzugleichen. Dies erfordert sowohl parallele bzw. multiplexfähige Kalibrationshardware als auch nichtiterative Abgleichstrategien.

5.2 Systemkonzept eines automatisierten Kalibrationsmeßplatzes für Druckmeßumformer

Im Rahmen dieses Abschnitts soll ein Systemkonzept für einen Kalibrationsmeßplatz vorgestellt werden, der für den automatisierten Abgleich von Druckmeßumformern geeignet ist. Ebenso wie beim Entwurf des kennlinienbasierten Sensorsystems wird hier auf eine hohe Anpassungsfähigkeit geachtet, damit der Kalibrationsmeßplatz wie schon das Sensorsystem durch geringfügige Änderungen für den Abgleich anderer Meßwertumformer geeignet ist. **Bild 5.1** zeigt den Aufbau eines automatisierten Meßplatzes, der eine effiziente Kalibration und Temperaturkompensation von einer größeren Stückzahl an Druckmeßumformern erlaubt.

Bei den hier im vorliegenden Beispiel zu kalibrierenden Druckmeßumformern handelt es sich um hybrid aufgebaute Sensorsysteme gemäß Bild 4.35, in denen das universal verwendbare Sensor-Auslese-IC aus Kapitel 4.4 mit den technischen Daten aus Tabelle 4.3 verwendet wird.

Der Kalibrationsmeßplatz besteht zum einen aus einem Steuer-PC, der die zeitliche Vorgabe von Druck- und Temperaturprofilen übernimmt. Auf dem Steuer-PC wird zudem ein graphisches User-Interface als Bedieneroberfläche zur Konfiguration der Kalibrationsparameter bereitgestellt. Die Druckvorgabe erfolgt über elektrisch ansteuerbare Schalt- und Proportionalventile, die über eine PC-Einsteckkarte mit 6 analogen Ausgängen sowie 24 digitalen Ein- und Ausgänge eingestellt werden können. Die Drucksteuerung wird von außen über einen Kompressor oder eine Gasflasche mit Druckluft versorgt.

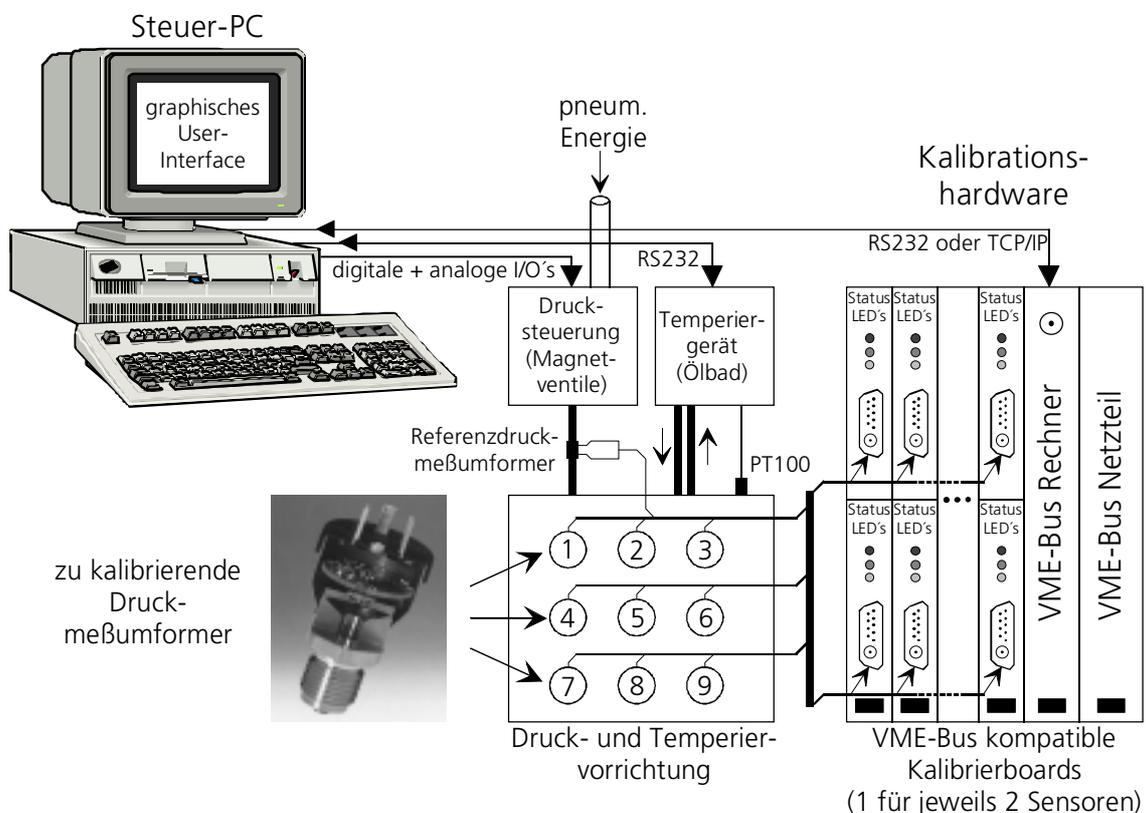


Bild 5.1 automatisierter Meßplatz zur Kalibration von Druckmeßumformern

Die zu kalibrierenden Druckmeßumformer werden in einer entsprechenden Vorrichtung eingeschraubt, so daß jeder Prüfling dem aus der Drucksteuerung erzeugten Druck ausgesetzt ist. Diesen Druck sehen nicht nur die Prüflinge, sondern auch ein hochgenauer Referenzdruckmeßumformer, der einen entsprechenden Sollwert für den Abgleich der Prüflinge vorgibt. Die komplette Druckvorrichtung befindet sich zudem auf einer Platte, die über ein kommerziell erworbenes Temperiergerät erwärmt oder abgekühlt werden kann. Die Kommunikation zwischen dem Steuer-PC sowie dem Temperiergerät erfolgt über eine serielle RS232-Schnittstelle.

Weiterhin besteht der Kalibrationmeßplatz aus einem kommerziell erworbenen VME-Bus-Rechner, der eine 32bit-CPU aus der 68000-Familie mit einem nach Industriestandard genormten Prozessorbus besitzt. Dieser sog. VME-Bus wird häufig in der industriellen Meßtechnik verwendet und wird hier mit einem 16bit breiten Daten- und 24bit breiten Adressbus betrieben. Der VME-Bus-Rechner besitzt zudem eine serielle RS232-Schnittstelle für Diagnosezwecke und ist für die Übertragung von Daten und Befehlen über einen Ethernet-Anschluß mit der Netzwerk-Karte des Steuer-PC's verbunden. Auf dem VME-Bus-Rechner läuft eine modulare Kalibrationssoftware auf Basis eines Multi-Tasking-Betriebssystems (Vx-Works) ab.

Um den Informationsaustausch mit dem übergeordneten VME-Bus-Rechner zu gewährleisten, dienen je nach Anzahl der zu kalibrierenden Druckmeßumformer ein bis mehrere identische Kalibrierboards mit einem Standard VME-Bus-Interface. Jedes der Kalibrierboards erlaubt den Anschluß von jeweils zwei Druckmeßumformern mit einer digitalen Kalibrationschnittstelle und unterschiedlichen analogen Schnittstellen, die zum Austausch von Meß- und Kalibrationsinformationen dienen. Die digitale Schnittstelle der Meßwertumformer ist als eine serielle SPI-Bus kompatible SCAN-Pfad-Schnittstelle ausgelegt, über die Kalibrationsinformationen ausgetauscht werden können. Die analoge Schnittstelle kann in Form eines Strom- oder Spannungsausganges in einer Zwei- oder Dreileiter-Ausführung ausgelegt sein¹. Die Kalibrierboards sind Einsteckkarten in Doppel-Europa-Extended-Format und bestehen hauptsächlich aus einer analogen Schnittstellenanpassung, einem 16bit A/D-Wandler zur Digitalisierung der analogen Meßwertinformationen, einem VME-Bus-Interface zur Anpassung an den standardisierten Prozessorbus und einem digitalen IIR-Filter inkl. einer Taktrückgewinnung (PLL) zur Stützstellendetektion. Sie unterscheiden sich lediglich durch eine individuell über DIP-Schalter einstellbare Kartenadresse, damit der VME-Bus-Rechner bei Bedarf die Einsteckkarten gezielt ansprechen kann.

Die Spannungsversorgung der einzelnen Einsteckkarten übernimmt ein VME-Bus-Netzteil, das einfach parallel zu den anderen Einsteckkarten in ein Standard-VM-Bus-Gehäuse montiert wird. Diese Versorgungsspannungen werden auf den Kalibrierboards über DC/DC-Wandler galvanisch getrennt zur Verfügung gestellt. Die auf den Kalibrierboards benötigten Betriebsspannungen werden aus der galvanisch getrennten Versorgung über Linearregler und Filterschaltungen weiter aufbereitet.

¹ Typische Ausführungen sind 4..20mA (Zweileiter), 0..20mA (Dreileiter), 0,5..4,5V (Dreileiter), 1..6V (Dreileiter) und 0..10V (Dreileiter) - Schnittstellen.

5.3 Ablauf der Kalibrationsprozedur

Nach der Beschreibung der Kalibrationshardware wird in den nachfolgenden Abschnitten auf den Ablauf der Kalibration vom Anfang bis zum Ende detailliert eingegangen. Am Anfang steht die Bestückung der Anlage mit den zu kalibrierenden Druckmeßumformern sowie die Konfiguration der Kalibrationsparameter an. Alle nachfolgenden Schritte der Kalibration laufen vollautomatisch ab. Zu diesen Schritten zählt neben einer temperaturunabhängigen Nullpunkt- und EndwertEinstellung die Korrektur der temperaturabhängigen Drifteffekte. Da die Drifteffekte über geeignete Einträge im Kennlinien-Speicher korrigiert werden, müssen beim kontinuierlichen Durchfahren eines Temperaturprofils die Zeitpunkte über eine spezielle Hardware detektiert werden, an denen jeweils die Einträge im Kennlinien-Speicher ermittelt werden müssen. Auf die Hardware zur Detektion einer Stützstelle bzw. zur Ermittlung eines Kennlinien-Eintrages wird an geeigneter Stelle ausführlich eingegangen. Am Ende der Kalibration werden je nach Speichermedium die zuvor bestimmten Einstellungen reversibel oder nichtreversibel im Speicher abgelegt. Abschließend wird für jeden Druckmeßumformer ein zur Fabrikationsnummer korrespondierendes Kalibrierprotokoll erstellt, in dem die ermittelten Sensorkennwerte zusammen mit den Ergebnissen aus vorhergehenden Kontrollmessungen abgelegt werden.

5.3.1 Konfiguration der Kalibrierparameter

Zu Anfang der Kalibration werden über das graphische User-Interface des Steuer-PC benutzergeführt wichtige Punkte zur Konfiguration der Kalibration abgefragt. Beim Start des Kalibrationsprogramms wird der Benutzer aufgefordert, den für den Druckmeßumformer gewünschten Meßbereich (z.B. 0..1bar) und die Art des elektrischen Ausgangs (z.B. 4..20mA) aus vorgegebenen Menüpunkten auszuwählen. Danach muß der Benutzer die Druckmeßumformer in die Vorrichtung schrauben und gegebenenfalls freie Plätze durch Blindstopfen ersetzen. Zudem müssen alle vorhandenen Druckmeßumformer mit den Schnittstellenkabeln der Kalibrierboards verbunden werden. Nach der Bestätigung dieses Vorgangs wird ein Dichtigkeitstest der Druckvorrichtung sowie eine Anwesenheitsdetektion der Druckmeßumformer über die digitale SCAN-Pfad-Schnittstelle durchgeführt. Spätestens jetzt muß der Benutzer die bereits auf den Druckmeßumformern eingravierten Fabrikationsnummern an den entsprechend belegten Meßplätzen eingeben, um eine eindeutige Zuordnung zu den am Ende der Kalibration erstellten Protokollen zu gewährleisten. Nach der Bestätigung der eingegebenen Fabrikationsnummern durch den Benutzer läuft die Kalibration vollautomatisch bis zum Ende durch, es sei denn es treten Fehler auf, die aus Sicherheitsgründen zum Abbruch der Kalibration führen.

5.3.2 Kurzübersicht über kompletten Kalibrationszyklus

Bevor jeder automatisierte Kalibrationsschritt detailliert beschrieben wird, soll in diesem Abschnitt eine kurze Übersicht über die Reihenfolge der notwendigen Kalibrationsschritte gegeben werden. Dazu sei das nachfolgende **Bild 5.2** betrachtet, in dem der zeitliche Ablauf der notwendigen Kalibrationsschritte graphisch dargestellt ist. Als erstes erfolgt ein Offset- bzw. Nullpunktabgleich bei Nulldruck $p=p_0$ und konstanter Temperatur $T=T_0$ um nachfolgend mit der Grundverstärkung die Empfindlichkeit bzw. die Meßspanne des Druckmeßumformer bei Nenndruck p_N und $T=T_0$ an den maximal gewünschten Endwert anzupassen.

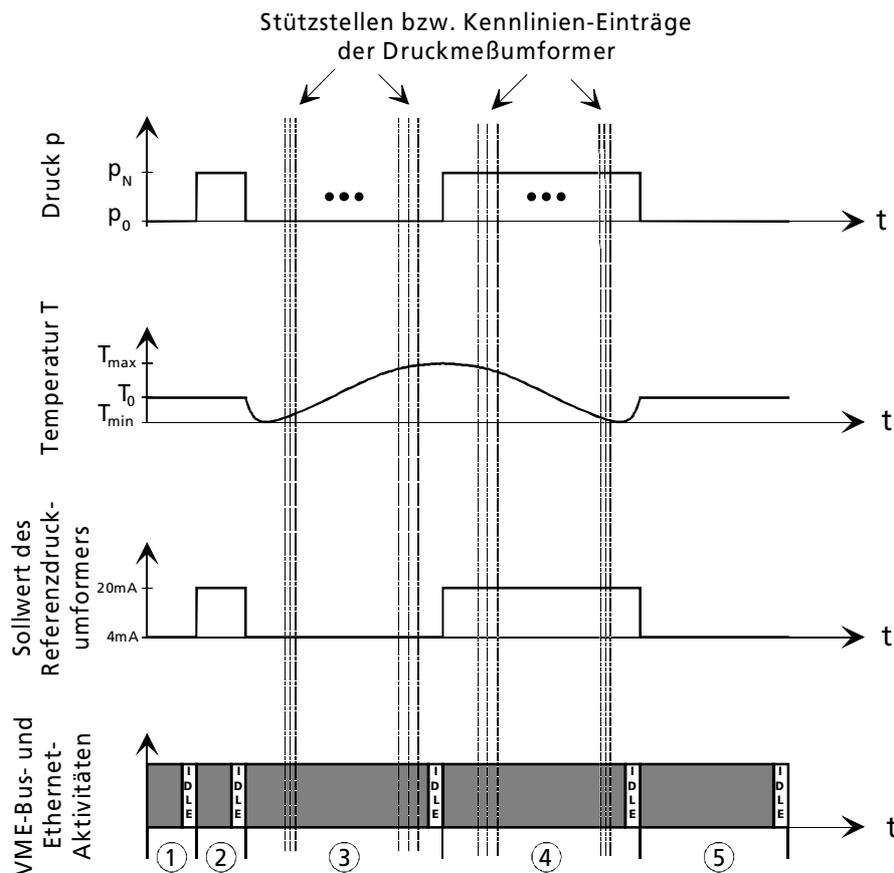


Bild 5.2 Übersicht der automatisierten Kalibrationschritte

Erst nach diesen beiden Schritten wird die Temperatur kontinuierlich hochgefahren. Beim Erreichen einer Stützstelle bzw. eines Kennlinien-Eintrages wird von der Kalibrationshardware ein Abgleichvorgang für die Einstellung des temperaturabhängigen Offsets bzw. Nullpunktes eingeleitet, um den Wert an der entsprechend aktuellen Stützstelle einzustellen. Sind alle Stützstellen aller Druckmeßumformer bzgl. des Nullpunkts eingestellt, so wird die Temperatur wieder heruntergefahren. Bei dem Herunterfahren der Temperatur werden alle Stützstellen in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen und für den Abgleich der Empfindlichkeit bzw. des Endwertes eingestellt.

Die einzelnen Einstellvorgänge dauern nur wenige ms, so daß die gesamte Kalibrationszeit durch die Geschwindigkeit für das Hochheizen und Herunterkühlen begrenzt wird. Limitierender Faktor ist hierbei die Trägheit bzw. die Wärmekapazität der gesamten Temperiervorrichtung. Nach den temperaturabhängigen Einstellvorgängen werden bei Raumtemperatur $T=T_0$ Kontrollmessungen bei Nulldruck $p=p_0$ sowie bei halbem und maximalem Nenndruck $p=p_N/2$ und $p=p_N$ durchgeführt. Diese Meßwerte werden zusammen mit den ermittelten Einstellungen in einem Kalibrierprotokoll abgelegt, das über die zu Anfang der Kalibration eingegebenen Fabrikationsnummer dem entsprechenden Druckmeßumformer zugeordnet ist. Im nachfolgenden sind alle Schritte des Abgleichvorgangs der Übersichtlichkeit halber nochmals stichpunktartig aufgeführt:

- ① Offset- bzw. Nullpunktabgleich bei Nulldruck $p=p_0$ und konstanter Temperatur $T=T_0$,
- ② Empfindlichkeits- bzw. Endwertabgleich bei Nenndruck $p=p_N$ und konstanter Temperatur $T=T_0$,
- ③ Temperaturabhängige Offset- bzw. Nullpunktkorrektur bei Nulldruck $p=p_0$ über dem maximal vorgegebenen Temperaturbereich von $[T_{\min}..T_{\max}]$,
- ④ Temperaturabhängige Empfindlichkeits- bzw. Endwertskorrektur bei Nenndruck $p=p_N$ über dem maximal vorgegebenen Temperaturbereich von $[T_{\min}..T_{\max}]$ und
- ⑤ abschließende Kontrollmessungen bei p_0 , $p_N/2$ und p_N , Festprogrammierung der ermittelten Einstellungen sowie das Auslesen der Protokolle aller kalibrierten Druckmeßumformer.

5.3.3 Nullpunkt- und Endwertabgleich

Bei den temperaturunabhängigen Einstellungen, die mit ① und ② in **Bild 5.2** gekennzeichnet sind, werden der Nullpunkt und der Endwert, bzw. daraus resultierend die Meßspanne des Druckmeßumformers, bei konstanter Temperatur $T=T_0$ - zumeist Raumtemperatur - justiert. Bei einem Druckmeßumformer mit einer 4..20mA-Zweileiter-Schnittstelle wird der Nullpunkt auf 4mA, der Endwert auf 20mA Gesamtstromverbrauch abgeglichen. Bevor jedoch die Einstellung des Endwertes auf 20mA erfolgen kann, muß der Nullpunkt bei Nulldruck $p=p_0$ auf 4mA Gesamtstromverbrauch abgeglichen werden, damit der Offset später bei maximalem Nenndruck $p=p_N$ nicht verstärkt in den Endwert eingehen kann. Der Abgleich des Offset kann optimal nur bei maximaler Grundverstärkung der programmierbaren SC-Verstärkerkette erfolgen. Bei Relativdrucksensoren entspricht der Nulldruck dem aktuellen Umgebungsdruck, während bei Absolutdrucksensoren der Nulldruck nur mit Hilfe einer Vakuumpumpe hergestellt werden kann. Da im Gegensatz zur Empfindlichkeitskompensation keine Grobeinstellung für den Offsetabgleich bei $T=T_0$ vorgesehen ist, erfolgt diese zunächst über gleichwertige Einträge in dem eigens für die temperaturabhängige Offsetkompensation reservierten Kennlinien-Speicher.

Die Ermittlung der benötigten Einstellung erfolgt über eine sukzessive Approximation. Dafür wird zu Beginn das Datenwort für die Einstellung des Offsets auf Null gesetzt. Anschließend wird das MSB auf eins gesetzt. Nachdem das geänderte Datenwort an die entsprechenden Stellen über die digitale SCAN-Pfad-Schnittstelle in den Kennlinien-Speicher des Druckmeßumformers geschrieben worden ist, wird über einen einfachen Vergleich der jeweils digitalisierten Signale geprüft, ob das Ausgangssignal des zu kalibrierenden Druckmeßumformers kleiner als das Ausgangssignal des Referenzdruckmeßumformers ist. Ist dies der Fall, so bleibt das MSB des Datenwortes gesetzt; andernfalls wird es wieder auf Null zurückgesetzt. Damit ist das MSB bestimmt. Dieser Vorgang wird anschließend für jedes weitere bit wiederholt, bis zum Schluß auch das LSB feststeht. Auf diese Weise steht das benötigte Datenwort zur Kompensation des Offsets innerhalb von nur wenigen Durchläufen fest.

Nachdem der Offset bzw. der Nullpunkt abgeglichen ist, kann die Empfindlichkeit bzw. der Endwert bei maximalen Nenndruck $p=p_N$ und konstanter Temperatur $T=T_0$ über die Grundverstärkung abgeglichen werden. Hierfür stehen dem universal verwendbaren Sensor-Auslese-IC insgesamt 7bit zur Verfügung, die auf die ersten beiden Stufen der digital programmierbaren SC-Verstärkerkette aufgeteilt sind. Damit die Grundverstärkung vom Rauschen her optimal gewählt wird, muß nach Möglichkeit in der ersten der drei hintereinander kaskadierten SC-Verstärkerstufen die maximal mögliche Verstärkung eingestellt werden.

5.3.4 Korrektur temperaturabhängiger Drifteffekte

Nachdem der Nullpunkt und der Endwert aller Druckmeßumformer bestimmt ist, leitet der Steuer-PC die Korrektur der temperaturabhängigen Nullpunkts- und Endwertsdrift ein. Hierzu wird ein Temperaturprofil vom Steuer-PC vorgegeben, dessen zeitlicher Verlauf durch entsprechende Parameter des Temperiergerätes in einer Init-Datei vorgegeben werden kann. In dieser Init-Datei wird zudem die minimal und maximal auftretende Temperatur T_{\min} und T_{\max} der Heizvorrichtung sowie alle Toleranz- und Genauigkeitsgrenzen für die Steuerung der Druck- und Temperaturprofile vorgegeben.

Da mehrere Einträge des Kennlinien-Speichers für eine erfolgreiche Korrektur der temperaturabhängigen Drifteffekte notwendig sind, muß für eine vollautomatisierte Kalibration beim kontinuierlichen Durchfahren des vorgegebenen Temperaturprofils der VME-Bus-Rechner die Information erhalten, wann eine Stützstelle erreicht ist bzw. wann die Ermittlung eines Kennlinien-Eintrages erfolgen kann. Diese Information ermittelt ein sogenannter Stützstellendetektor, der nicht nur über einen Interrupt mitteilt, wann welche Stützstelle oder welcher Kennlinien-Eintrag beim kontinuierlichen Durchfahren der Temperatur T erreicht ist, sondern auch wie weit man von dieser Stützstelle entfernt ist. Aus diesem Grund wird im nachfolgenden auf den Stützstellendetektor eingegangen, der einen überaus wichtigen Teil der externen Kalibrationshardware darstellt.

Hierzu sei zunächst das nachfolgende **Bild 5.3** betrachtet. Das interne, im IC befindliche Transversalfilter ist für die Adressierung des Kennlinien-Speichers verantwortlich. Da sich die Adressworte des Transversalfilters aufgrund der im Sperrbereich des $\Sigma\Delta$ -Modulators vorhandenen Rauschleistung mit der Taktfrequenz f_C ständig ändern, weiß man nicht, zu welchem Zeitpunkt ein Einstellvorgang eingeleitet werden muß. Hierzu wird der Stützstellendetektor verwendet, der genau wie das interne Transversalfilter das Ausgangssignal $y_{\Sigma\Delta}$ des $\Sigma\Delta$ -Modulators als Eingangssignal erhält. Der Stützstellendetektor besteht aus einer digitalen Taktrückgewinnung (PLL) und einem externen Digitalfilter.

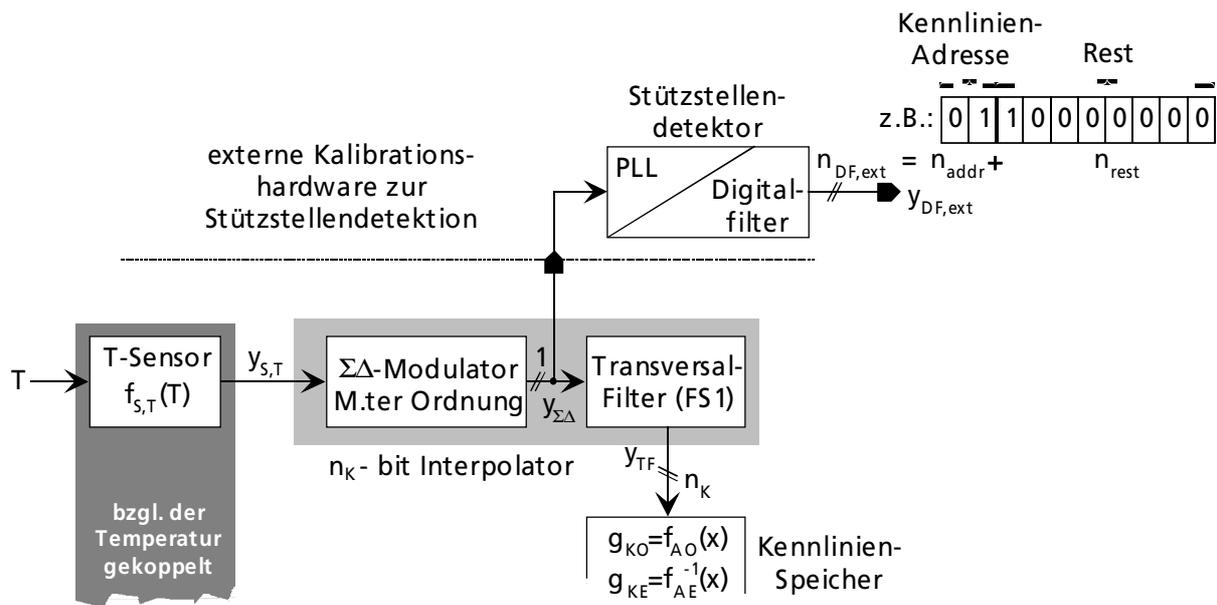


Bild 5.3 Stützstellendetektion

Mit der Taktrückgewinnung wird die Taktfrequenz f_C aus dem binären und pulshäufigkeitsmodulierten Ausgangssignal des $\Sigma\Delta$ -Modulators zurückgewonnen, mit der dann das nachfolgende externe Digitalfilter zur Stützstellendetektion getaktet wird. Da im Gegensatz zum Transversalfilter, das externe Digitalfilter aufgrund einer wesentlich geringer gewählten Eckfrequenz die Rauschleistung im Sperrbereich absenkt, resultiert ein wesentlich ruhigeres Ausgangssignal. Damit kann die Wortbreite $n_{DF,ext}$ am Ausgang $y_{DF,ext}$ des externen Digitalfilters aufgespreizt werden. Damit beispielsweise ein 10bit breites Datenwort am Ausgang $y_{DF,ext}$ des externen Digitalfilters bis auf das letzte Bit ruhig steht, muß der Rauschboden im Sperrbereich auf mindestens 60dB abgesenkt werden. Je nach Anzahl n der vorhandenen Kennlinien-Einträge geben die oberen bits ($n_{addr} = \log(n=2^{n_K})/\log(2)$) des aufgespreizten Datenwortes $y_{DF,ext}$ die aktuelle Kennlinien-Adresse an, während die restlichen bits ($n_{rest} = n_{DF,ext} - n_{addr}$) den Abstand zur aktuell angegebenen Adresse angeben.

Für die zuvor angesprochene Taktrückgewinnung wird eine digitale Phasenregelschleife PLL (im engl. **Phase Locked Loop**) gemäß **Bild 5.4** verwendet [92]. Die komplette Regelschleife besteht aus einem Phasendetektor, einem Schleifenfilter und einem digital kontrollierten Oszillator. Der Phasendetektor besteht aus einem einfachen EXOR-Gatter und vergleicht die Phasenlage des zurückgewonnenen Taktsignals y_{PLL} mit der des Eingangssignals x_{PD} . Dieses Eingangssignal des Phasendetektors wird über einen vorgeschalteten Flankendetektor generiert, indem das pulshäufigkeitsmodulierte Ausgangssignal $y_{\Sigma\Delta}$ des $\Sigma\Delta$ -Modulators differenziert und anschließend gleichgerichtet wird. Der arithmetische Mittelwert der Regelabweichung am Ausgang y_{PD} des Phasendetektors gibt ein Maß für den Phasenfehler φ_e an. Ist dieser arithmetische Mittelwert der Regelabweichung null, so existiert kein Phasenfehler ($\varphi_e=0$).

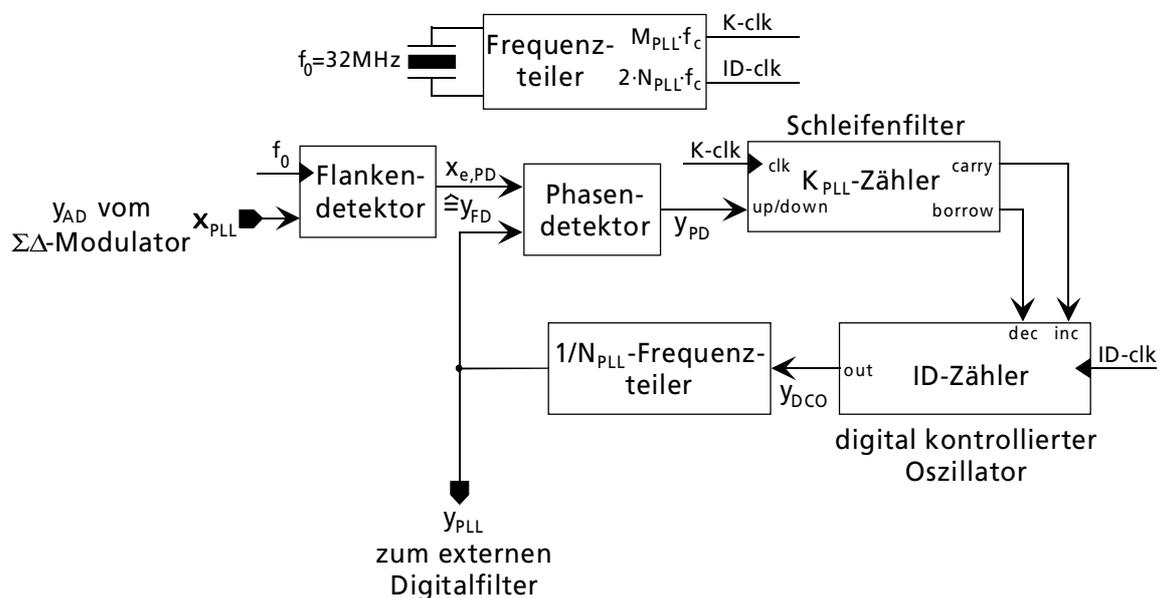


Bild 5.4 Taktrückgewinnung mittels einer digitalen Phasenregelschleife (PLL)

Die Regelabweichung wird auf das nachfolgende Schleifenfilter gegeben, das aus zwei Aufwärtszählern besteht, deren maximale Zählerstände jeweils den Wert K_{PLL} annehmen können. Das Ausgangssignal des Phasendetektors bestimmt, welcher der beiden Zähler aktiv ist und mit dem anliegenden Takt $M_{PLL} \cdot f_c$ aufwärtsgezählt wird. Jeweils das MSB der beiden Zähler wird als Ausgangssignal des Schleifenfilters benutzt. Die Ausgänge werden demzufolge dann logisch eins, wenn der Zählerstand größer oder kleiner als $K_{PLL}/2$ ist. Liegt kein Phasenfehler vor, so wird genau ein sog. carry- und ein borrow-Signal an den Ausgängen des Schleifenfilters erzeugt, während bei einem Phasenfehler von ungleich null mehrere carry und borrow-Signale erzeugt werden, da das Steuersignal des Phasendetektors asymmetrisch ist. Diese Ausgangssignale des Schleifenfilters vergrößern oder verkleinern letztendlich die Eingangsfrequenz $2 \cdot N_{PLL} \cdot f_c$ am digitalen Oszillator solange, bis der Phasenfehler φ_e minimal wird, d.h. die Frequenz am Ausgang des $1/N$ -Frequenzteilers der Frequenz des pulshäufigkeitsmodulierten Ausgangssignals des $\Sigma\Delta$ -Modulators entspricht.

Da die Taktfrequenz f_C des Sensor-Auslese-IC's mit einem on-chip RC-Oszillator erzeugt wird, kann diese Frequenz ihren Absolutwert aufgrund von Technologieschwankungen um $\pm 20\%$ variieren. Der Haltebereich Δf_H der zuvor beschriebenen digitalen Phasenregelschleife, innerhalb dessen ein Einrasten auf die Eingangsfrequenz f_C möglich ist, kann gemäß der nachfolgenden Gleichung angegeben werden zu:

$$\Delta f_H = \pm \frac{M_{PLL} \cdot f_C}{2 \cdot K_{PLL} \cdot N_{PLL}} \quad (5.1)$$

Wählt man $M_{PLL}=16$, $N_{PLL}=8$ und $K_{PLL}=4$ so ergibt sich bei einer eingestellten Taktfrequenz f_C von 100kHz ein Haltebereich Δf_H von ± 25 kHz. Mit der zurückgewonnenen Frequenz, die am Ausgang y_{PLL} der digitalen Phasenregelschleife zur Verfügung steht, wird das nachfolgende externe Digitalfilter zur Stützstellendetektion aus **Bild 5.5** getaktet. Das externe Digitalfilter besteht dabei aus zwei kaskadierten Filterstufen. Die erste Filterstufe entspricht einem FIR-Filter, das genau wie das bereits im IC vorhandene Transversalfilter eine $\sin(x)/x$ -förmige Übertragungscharakteristik besitzt, während als zweite Filterstufe ein IIR-Filter verwendet wird.

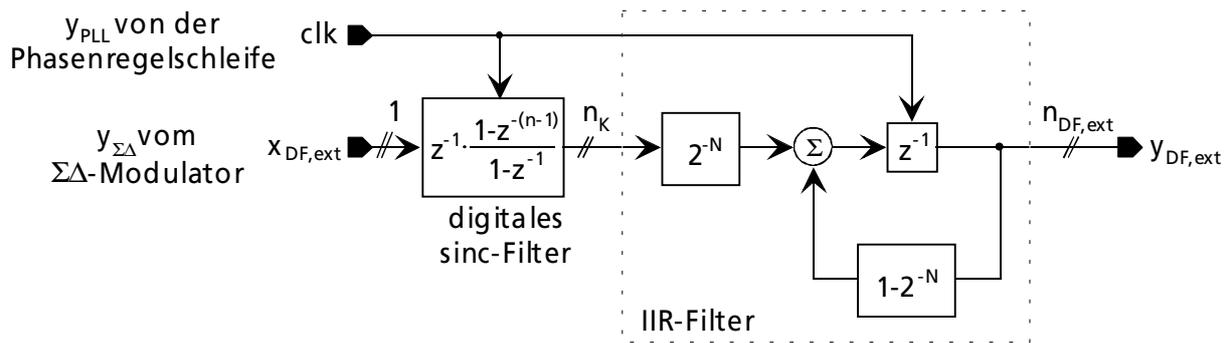


Bild 5.5 Aufbau des externen Digitalfilters zur Stützstellendetektion

Die Übertragungsfunktion $H_{DF,ext}(z)$ des externen Digitalfilters zur Stützstellendetektion ergibt sich gemäß Bild 5.5 zu:

$$H_{DF,ext}(z) = \frac{y_{DF,ext}(z)}{x_{DF,ext}(z)} = \frac{a_1}{z - b_1} \cdot z^{-1} \cdot \frac{1 - z^{-(n-1)}}{1 - z^{-1}} \quad (5.2)$$

mit den Koeffizienten: $a_1 = 2^{-N}$ und $b_1 = 1 - 2^{-N}$. (5.3)

Setzt man den Betrag der Übertragungsfunktion gleich $n/\sqrt{2}$, so ergibt sich die -3dB-Eckfrequenz f_{-3dB} des externen Digitalfilters unter der Bedingung $f_{-3dB} \ll f_C$ nach einigen Umformungen zu:

$$f_{-3dB}(N) \cong \frac{f_C}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{2^{-N}}{2^N - 1}} \quad (5.4)$$

Die Eckfrequenz wird dabei nur durch den in den Koeffizienten a_1 und b_1 der zweiten Filterstufe vorkommenden Faktor N bestimmt. Die Anzahl n der in der ersten Filterstufe verwendeten Verzögerungsglieder geht dabei nicht in die Eckfrequenz des externen Digitalfilters zur Stützstellendetektion ein.

Die Funktionsweise des Stützstellendetektors kann anhand des nachfolgenden **Bild 5.6** verdeutlicht werden. Hierzu sind zum einen die resultierenden Verteilungsfunktionen am Ausgang des $\Sigma\Delta$ -Modulators über der Temperatur T aufgetragen. Zum anderen ist in diesem Bild der Verlauf des nach Adresse und Rest aufgespaltenen Datenwortes am Ausgang des externen Digitalfilters zur Stützstellendetektion dargestellt. Die Adresse gibt an, wo der ermittelte Korrekturwert in den Kennlinien-Speicher geschrieben werden muß, wobei der Rest angibt, wie weit man sich von der aktuellen Adresse entfernt befindet. Der pulshäufigkeitsmodulierte Bitstrom am Ausgang des $\Sigma\Delta$ -Modulators wurde in dem gezeigten Beispiel mit dem externen Digitalfilter derart stark gefiltert ($N=10 \Rightarrow f_{-3dB} \sim 15,55\text{Hz}$), daß ein 10bit breites Wort zur Verfügung steht, welches bei konstant anliegender Temperatur T bis auf das LSB stabil am Ausgang des externen Digitalfilters zur Stützstellendetektion anliegt.

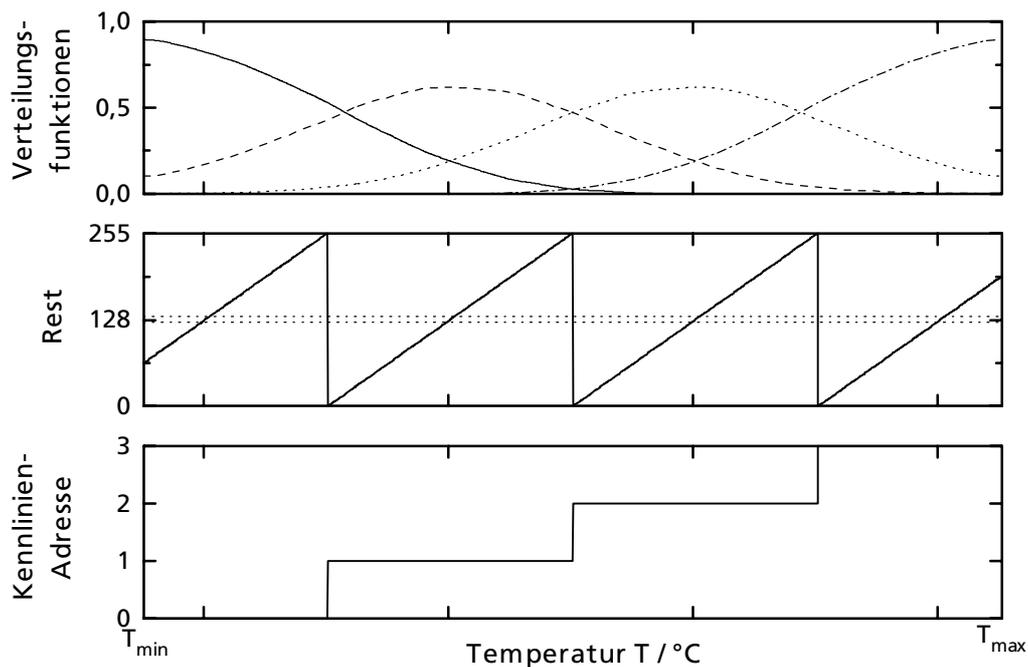


Bild 5.6 Stützstellenverteilung mit dem nach Adresse und Rest aufgespaltenen Datenwort des externen Digitalfilters zur Stützstellendetektion

Damit nicht unmittelbar nach der Detektion einer Stützstelle die Adressinformation wechselt, sondern diese solange am Ausgang des externen Digitalfilters anliegt, wie man sich näher an der angezeigten als an einer benachbarten Stützstelle befindet, wird auf das Datenwort am Ausgang $y_{DF,ext}$ des Digitalfilters nach Bild 5.5 lediglich ein konstanter Offset von $2^{n_{rest}}/2$ hinzugeaddiert.

Bei 4 vorhandenen Kennlinien-Einträgen wird demzufolge eine Stützstelle genau dann erkannt, wenn die restlich verbleibenden 8bits am Ausgang des Stützstellendetektors den Wert 128 ± 1 anzeigen. In einem solchen Fall löst der Stützstellendetektor ein Interrupt für den VME-Bus-Rechner aus. Nachfolgend ermittelt der VME-Bus-Rechner, welche der Druckmeßumformer einen Interrupt ausgelöst haben. Für diese Druckmeßumformer wird unmittelbar danach ein Kalibrationsvorgang eingeleitet, der den benötigten Korrekturwert an dieser Stelle derart ermittelt, daß das Ausgangssignal des Druckmeßumformers mit dem Wert des Referenzdrucksensors übereinstimmt. Der ermittelte Korrekturwert wird über die ebenfalls vom Stützstellendetektor verfügbare Adressinformation in den Kennlinien-Speicher geschrieben. Bei dieser Vorgehensweise kann die Temperatur zeitkontinuierlich verändert werden - es entfällt das sonst zeitaufwendige Anfahren und Einregeln von vorgegebenen Temperaturpunkten. Zudem ermöglicht die automatische Erkennung, mehrere Druckmeßumformer gleichzeitig zu kalibrieren, deren Stützstellen bzw. Kennlinien-Einträge nicht bei identischen Temperaturen erreicht werden. Aus diesem Grund werden keine abgeglichenen Temperatursensoren zur Bereitstellung der Störgrößeninformation benötigt.

Nach der Vorstellung der notwendigen Kalibrationshardware zur Detektion von Stützstellen kommen wir zurück zum Abgleich der temperaturabhängigen Drifteffekte. Als erstes leitet der Steuer-PC den Offset- bzw. Nullpunktabgleich gemäß Punkt ③ aus **Bild 5.2** ein. Hierzu wird der Nulldruck $p=p_0$ eingestellt und die Temperiervorrichtung von Raumtemperatur T_0 auf eine minimale Temperatur T_{\min} abgekühlt. Beim Erreichen von $T=T_{\min}$ wird ein Abgleich des Nullpunkts auf 4mA für alle Druckmeßumformer durchgeführt. Über diesen und den bereits zuvor bestimmten Korrekturwert bei $T=T_0$ kann mit einer jeweils zusätzlichen Information des Stützstellendetektors eine Initialisierung des entsprechenden Bereiches im Kennlinien-Speicher erfolgen, der zur Korrektur der temperaturabhängigen Offset- bzw. Nullpunktsdrift notwendig ist. Der Vorgang der Initialisierung ist anhand eines Beispiels in dem nachfolgenden **Bild 5.7** verdeutlicht. Die Initialisierung basiert dabei auf einer linearen Schätzung, die aus den zwei bereits zuvor ermittelten Korrekturwerten bei $T=T_{\min}$ und $T=T_0$ hervorgeht. Da diese bereits ermittelten Korrekturwerte nicht unmittelbar an Stützstellen liegen, muß zusätzlich die Information des Stützstellendetektors ausgewertet werden, um herauszufinden, wie weit man bei $T=T_{\min}$ und $T=T_0$ von einer Stützstelle entfernt liegt, damit darüber auf die Korrekturwerte unmittelbar an den Stützstellen zurückgeschlossen werden kann. Nach der Initialisierung des Kennlinien-Speichers bei $T=T_{\min}$ veranlaßt der Steuer-PC das kontinuierliche Aufheizen der Temperiervorrichtung auf $T=T_{\max}$. Beim Aufheizen wird nun über den Stützstellendetektor an jeder überstrichenen Stützstelle des Druckmeßumformers ein Interrupt für den übergeordneten VME-Bus-Rechner ausgelöst. Der Rechner ermittelt, welcher der Druckmeßumformer eine Stützstelle erreicht hat, und leitet für Interrupt einen Kalibrationsvorgang zur Bestimmung eines geeigneten Korrekturwertes ein.

Der Korrekturwert an der entsprechenden Stützstelle muß aufgrund der bereits erfolgten Initialisierung nur noch um wenige Zähler verändert werden, damit der Ausgangswert des Druckmeßumformers mit dem vorgegebenen Wert des Referenzdruckmeßumformers übereinstimmt.

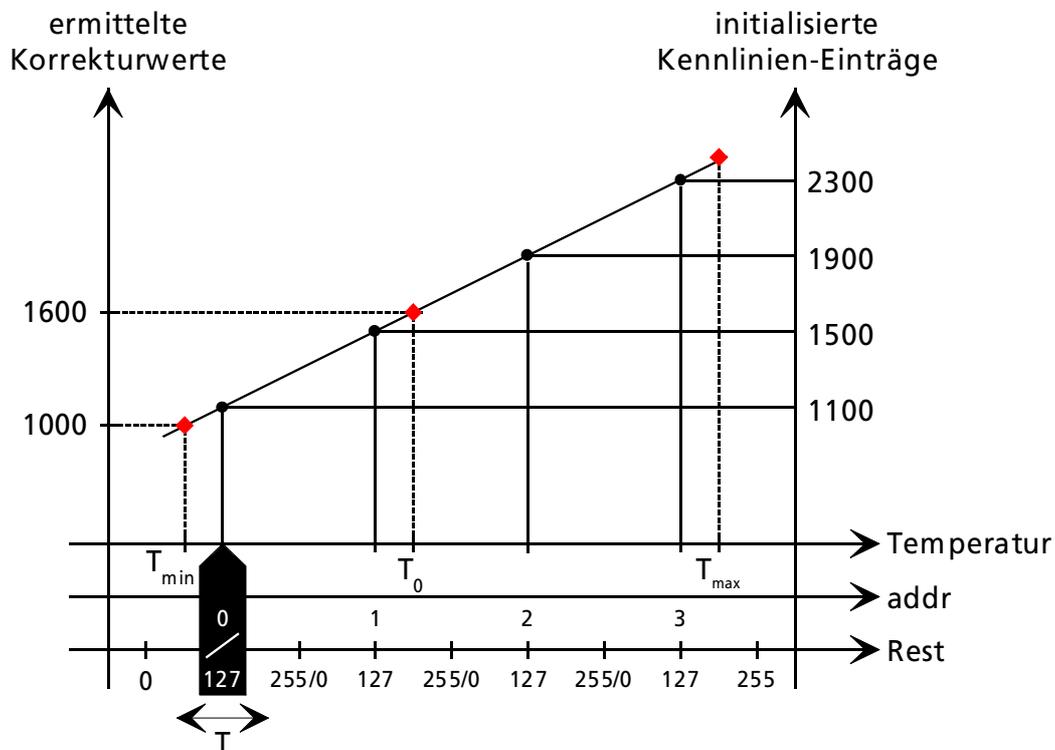


Bild 5.7 Initialisierung des Kennlinien-Speichers bei $T=T_{\min}$ und $T=T_{\max}$

Hat die Temperiervorrichtung die maximale Temperatur T_{\max} erreicht, so leitet der Steuer-PC die Korrektur der temperaturabhängigen Endwertsdrift gemäß Punkt ④ aus **Bild 5.2** ein. Dazu wird der Druck p auf den maximalen Nenndruck p_N erhöht. Jetzt wird für jeden Druckmeßumformer sein Endwert auf 20mA eingestellt. Mit den bei $T=T_{\max}$ und $T=T_0$ ermittelten Korrekturwerten und den zusätzlichen Informationen des Stützstellendetektors kann jetzt der Bereich des Kennlinien-Speicher initialisiert werden, der für die Korrektur der temperaturabhängigen Empfindlichkeits- bzw. Meßspanndrift verantwortlich ist. Nach erfolgter Initialisierung bei $T=T_{\max}$ sorgt der Steuer-PC dafür, daß die Temperiervorrichtung wieder kontinuierlich bis auf $T=T_{\min}$ abgekühlt wird. Beim Abkühlvorgang der Temperiervorrichtung treten wiederum Stützstellen, jetzt jedoch in umgekehrter Reihenfolge auf. Bei jeder detektierten Stützstelle müssen die entsprechenden Kennlinien-Einträge aufgrund der vorhergehenden Initialisierung nur um wenige Zähler korrigiert werden. Das nachfolgende **Bild 5.8** zeigt die Kennlinien-Entwicklung für die Korrektur der Offset- und Empfindlichkeitsdrift während eines kompletten Kalibrationszyklus angefangen von der Initialisierung bis zum Erreichen der letzten Stützstelle.

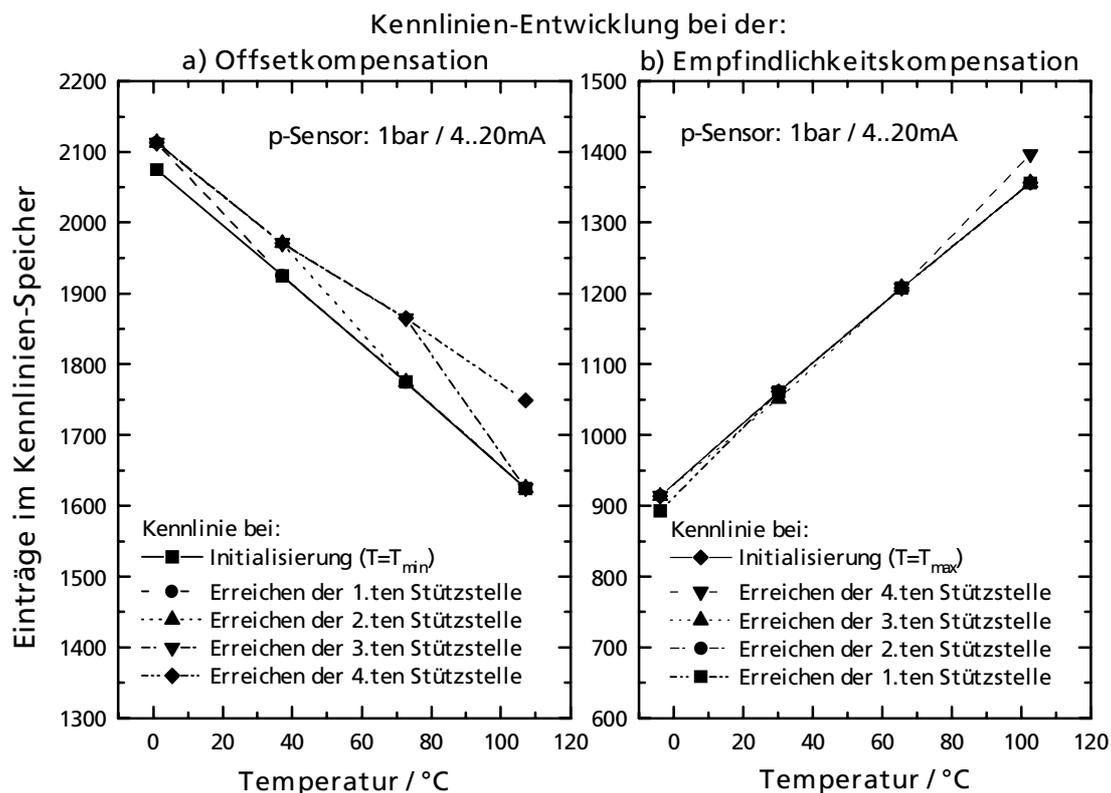


Bild 5.8 Kennlinien-Entwicklung während der Kalibration

Verfolgt man die Kennlinien-Entwicklung, so zeigt sich, daß die Initialisierung einen brauchbaren Trend der letztendlich ermittelten Kennlinien-Werte bereits vor der eigentlichen Einstellung der Stützstellen angibt. Alle Korrekturwerte an den Stützstellen werden wie auch schon zuvor bei den temperaturunabhängigen Einstellungen über eine sukzessive Approximation eingestellt. Für die Einstellung eines Korrekturwertes werden aufgrund der vorhandenen Einstellgenauigkeit für den Offset 12 und für die Empfindlichkeit 11 Durchläufe benötigt. Kann der Ausgangswert des Druckmeßumformers über die zur Verfügung stehenden Korrekturwerte nicht an den Wert des Referenzdruckumformers angenähert werden, so wird der Druckmeßumformer als defekt gekennzeichnet. Druckmeßumformer, bei denen während einer kompletten Temperaturfahrt die inneren zwei Stützstellen nicht auftreten, werden ebenfalls als defekt gekennzeichnet.

5.3.5 Abschließende Aktionen am Ende der Kalibration

Nachdem die minimale Temperatur $T=T_{\min}$ erreicht ist, werden alle ermittelten Einstellungen in den Kennlinien-Speicher fest einprogrammiert, indem die RAM-Zellen durch Anti-Fuses (Zener-Zap-Dioden) verriegelt werden. Für abschließende Kontrollmessungen wird die Temperatur T wieder auf Raumtemperatur $T=T_0$ hochgefahren.

Die Kontrollmessungen erfolgen bei Nulldruck p_0 , halbem und maximalem Nenndruck p_N . Mit diesen Meßergebnissen zusammen werden die ermittelten Einstellungen in ein Kalibrierprotokoll abgelegt, mit dem über die zu Beginn der Kalibrierung eingegebenen Fabrikationsnummern eine eindeutige Zuordnung zu den Druckmeßumformer erfolgen kann. Die Kalibrierprotokolle der verschiedenen Druckmeßumformer werden über die Ethernet-Verbindung auf dem Steuer-PC in einem Excel-Format abgelegt.

5.4 Vorstellung von Kalibrierungsergebnissen

Um die Funktionsweise der entwickelten Kalibrationsanlage zu demonstrieren, wurden mehrere Druckmeßumformer mit der Anlage gleichzeitig abgeglichen. Die Druckmeßumformer besitzen eine analoge 4..20mA Zweileiter-Schnittstelle und sollten auf einen Meßbereich von 0..1bar (relativ zum Umgebungsdruck) kalibriert werden. Nach erfolgreicher Kalibrierung wurden die Druckmeßumformer in einem Temperaturschrank über einem Bereich von -20°C bis $+120^{\circ}\text{C}$ charakterisiert. Hierbei wurden der Nullpunkt NP, der Endwert EW und die Meßspanne MSP sowie die Temperaturdrift des Nullpunktes NPD20 und der Meßspanne MSP20, jeweils bezogen auf 20°C , aufgenommen. Die Meßergebnisse sind in dem nachfolgenden **Bild 5.9** gezeigt. Innerhalb des zu kompensierenden Temperaturbereichs von 0°C bis 100°C sind überaus zufriedenstellende Ergebnisse erzielt worden.

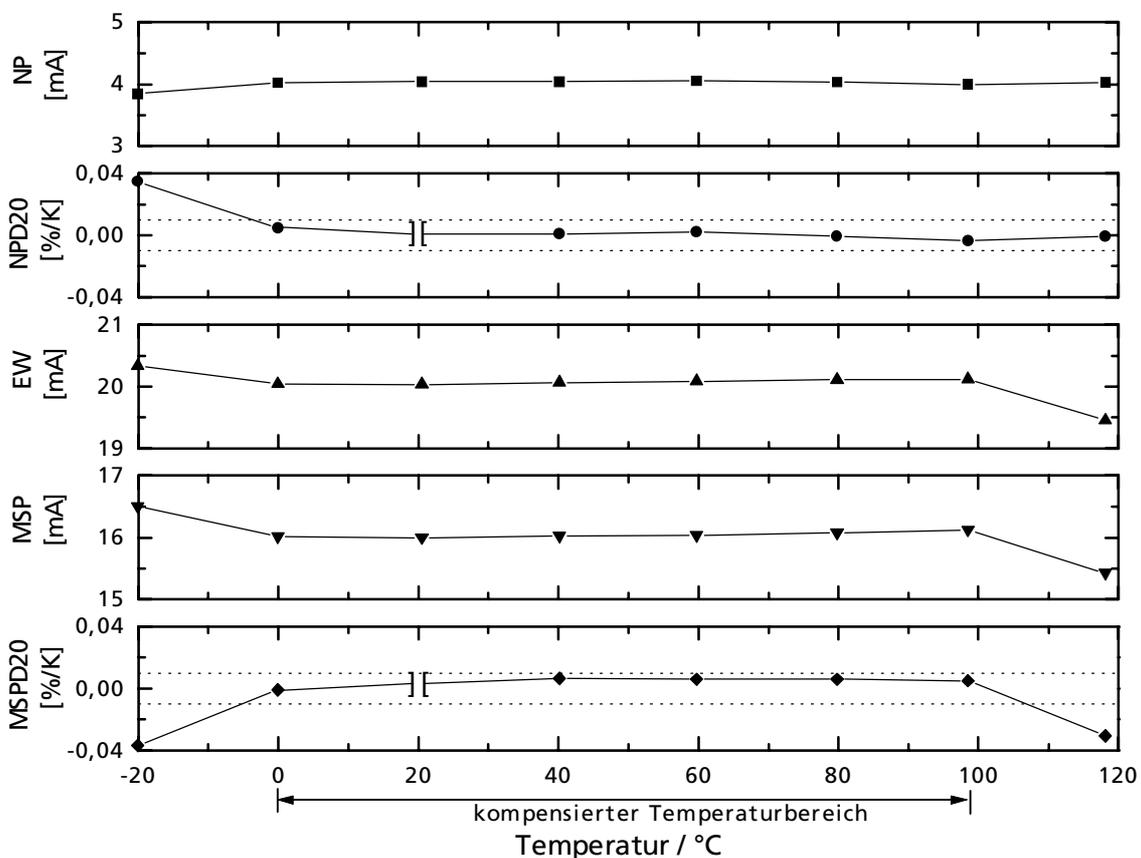


Bild 5.9 Charakterisierung eines abgeglichenen Druckmeßumformers (0..1bar, relativ, 4..20mA)

Der Nullpunkt NP und der Endwert EW konnten bei 20°C mit der geforderten Genauigkeit von $\pm 0.5\%$ auf 4mA bzw. 20mA eingestellt werden. Die Temperaturdrift des Nullpunktes NPD20 und der Meßspanne MSP20 bezogen auf 20°C konnte auf weniger als 0.01%/K bzw. 100ppm/K reduziert werden. Hieraus resultiert ein gesamter Fehler von weniger als 1% über den gesamten Temperaturbereich von 0°C bis 100°C (siehe dazu die im Bild 5.9 eingezeichneten Toleranzbänder). Außerhalb des kompensierten Temperaturbereiches nimmt der Fehler der charakteristischen Größen NP, EW, MSP, NPD20 und MSP20 des Druckmeßumformers stark zu.

Diese Tatsache ist einfach dadurch zu erklären, daß der Temperatursensor innerhalb des kompensierten Temperaturbereiches eine Ausgangsspannung liefert, die auf den maximalen Spannungsbereich des Temperatureingangs am universalen Sensor-Auslese-IC angepaßt ist. Soll ein größerer Temperaturbereich kompensiert werden, so muß lediglich die Empfindlichkeit des Temperatursensors erniedrigt werden. Um die erzielte Kompensationsgenauigkeit bei einem nichtlinearen Temperaturverhalten der verwendeten Meßzelle beizubehalten, muß dann allerdings die Anzahl der Stützstellen erhöht werden.