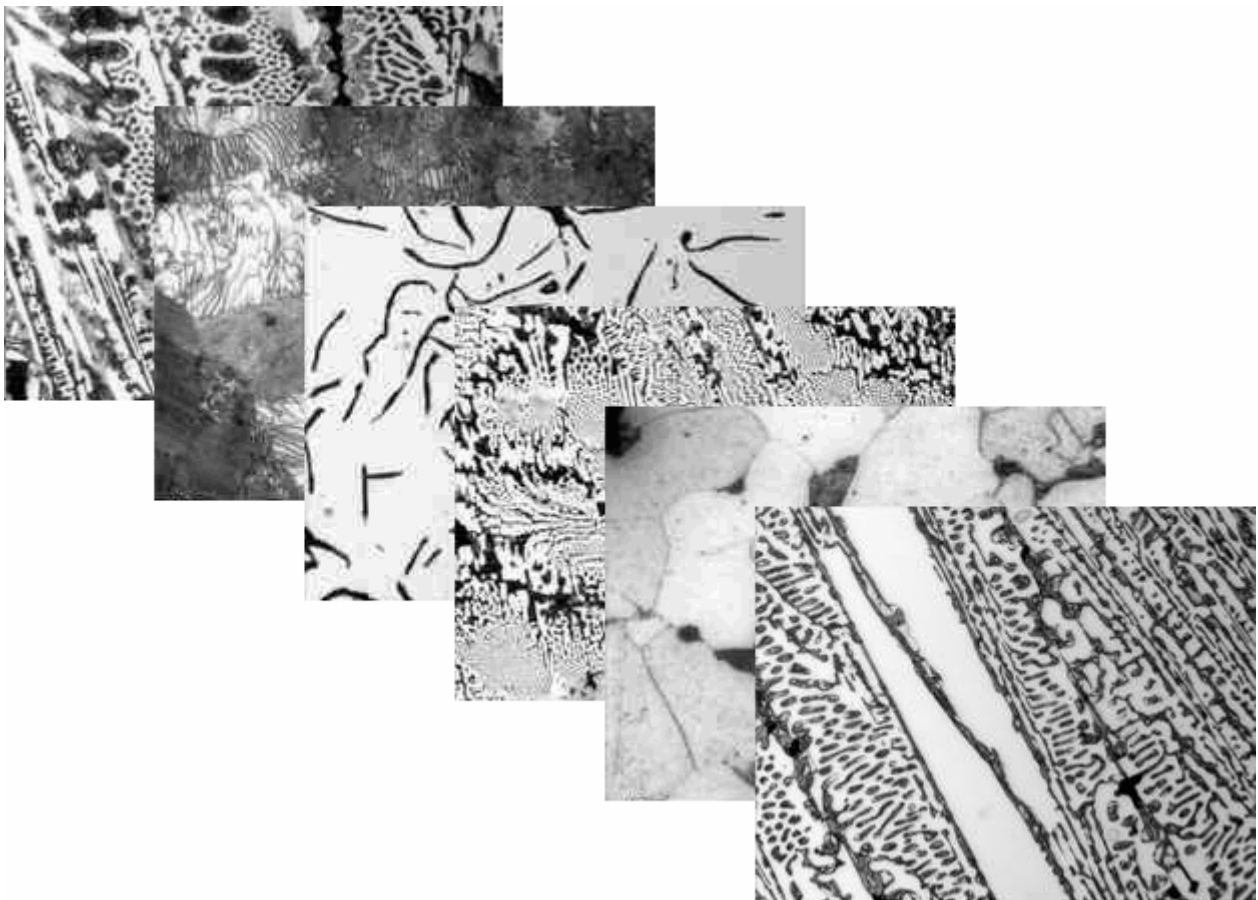


Beherrschte Diffusion: Qualitäts- und Prozessoptimierung für Wärmebehandlungen



Eine Zusammenfassung über eine innovative und adaptive
Regelungstechnologie zur automatischen Erstellung von optimierten
Behandlungsprogrammen für Diffusionsprozesse.

1. Einleitung

Beim Einsatzhärten wird der Gefügebau in metallischen Werkstoffen verändert, um bestimmte mechanische Eigenschaften zu erzielen. Da bei diesem Verfahren eine Vielzahl von Prozessparametern berücksichtigt werden müssen, ist dieses nur noch mit einer innovativen Regelungstechnologie zu bewältigen. Dies erspart zeit- und vor allem kostenintensive Versuchsreihen zur Optimierung des Wärmebehandlungsprozesses.

Die Firma demig Prozessautomatisierung bietet hierzu ein Sonderprogramm zur Online-Diffusionsberechnung für das Regelungssystem DE VR 4008 an. Aufgaben dieses Expertensystems sind:

- automatische Generierung von optimalen Behandlungsprogrammen
- adaptive Anpassung des aktuellen Behandlungsprogramms während des Behandlungsablaufes an den Prozess.

Die aufgezeichneten Messdaten dienen der Beweisführung bei Materialschäden und werden zur Qualitätssicherung im Rahmen der DIN ISO 9000ff verwendet. Dieses Expertensystem soll hier erläutert werden.

Im Zusammenspiel hierzu besteht die Möglichkeit, im übergeordneten Leitsystem prosys/2 eine Simulation des Diffusionsprozesses zu implementieren. Damit können Behandlungsprogramme für das Regelungssystem geschrieben und dessen Verläufe im Vorhinein simuliert werden. Diese Simulation erlaubt einen guten Einblick auf das Ergebnis der Wärmebehandlung. Ebenfalls besteht die Möglichkeit, nach der Simulation manuell Eingriffe in das automatisch erstellte Programm vorzunehmen, um den Verlauf der Wärmebehandlung zu beeinflussen. Eine erneute Simulation ist jederzeit möglich. Nach Erreichen des gewünschten Behandlungsverlaufes, bzw. Ergebnisses werden die Programmdateien an das Regelungssystem übertragen. Wenn das Expertensystem im Regelungssystem vorhanden ist, übernimmt dieses nun die adaptive "online" Regelung des Prozesses, ansonsten wird das im Leitsystem erstellte Behandlungsprogramm statisch von dem Regelungssystem abgearbeitet.

1.1. Wärmebehandlung

Für die unterschiedlichen Einsatzbereiche, in denen metallische Werkstoffe eingesetzt werden, sind ganz bestimmte mechanische Eigenschaften unerlässlich, die durch Härte, Zugfestigkeit, Streckgrenze, Kerbschlagzähigkeit oder Korrosionsbeständigkeit gekennzeichnet sind.

Mit speziellen Wärmebehandlungsverfahren werden daher die Werkstoffe in ihrem jeweiligen Gefügebau so verändert, bis sie den gewünschten Anforderungen entsprechen.

Voraussetzungen sind Kenntnisse über den Gefügebau im (erkalteten) Gleichgewichtszustand, sowie über die thermisch bedingten Abläufe und Reaktionen, die zu einer Gefügeeänderung führen.

Um bestimmte Produkteigenschaften im Werkstoff zu kombinieren, wie z.B. eine korrosions- und verschleissbeständige (gehärtete) Oberfläche bei entsprechender Kernzähigkeit, werden vor allem in den Randbereichen die Gefügeeigenschaften verändert werden. Eines der häufigst genutzten Verfahren ist das Einsatzhärten. Hierbei dringen in der Aufkohlungsphase (Einsetzen) Kohlenstoffatome zur Anreicherung in die Randbereiche der Werkstücke ein (Diffusion) und ergeben damit beim nachfolgenden Abschrecken den geforderten Härtegrad in dieser Zone, ohne die bisherigen Eigenschaften des Kerns zu verändern.

1.2. Prozessbeherrschung

Die exakte Beherrschung und Reproduzierbarkeit dieses Diffusionsprozesses ist Voraussetzung für die Erzeugung der optimalen Werkstoffeigenschaften. Dabei ist eine Vielzahl von Parametern (wie z.B. Aufkohlungstemperatur und -dauer, und Zusammensetzung des Atmosphärgases) zu berücksichtigen, die neben den Legierungsbestandteilen und der damit verbundenen Affinität mit

dem Diffusionsmedium, sowie den Anlagenbesonderheiten und der Werkstückgeometrie Einfluss auf das Ergebnis haben.

Diese Komplexität ist nur noch mit einer innovativen Regelungstechnik zu bewältigen. So genannte Expertensysteme, basierend auf den Erfahrungswerten langjähriger Untersuchungen, ermöglichen nicht nur die Eingaben aller bekannten Fakten für die automatische Programmgenerierung (Prozessanalyse), sondern passen sich auch adaptiv während des Verfahrensablaufes an den Prozess an. Die Aufzeichnung und Prozessbewertung nach der Behandlung ermöglicht die Qualitätskontrolle und wird als zusätzlicher Erfahrungswert für nachfolgende Programme gespeichert.

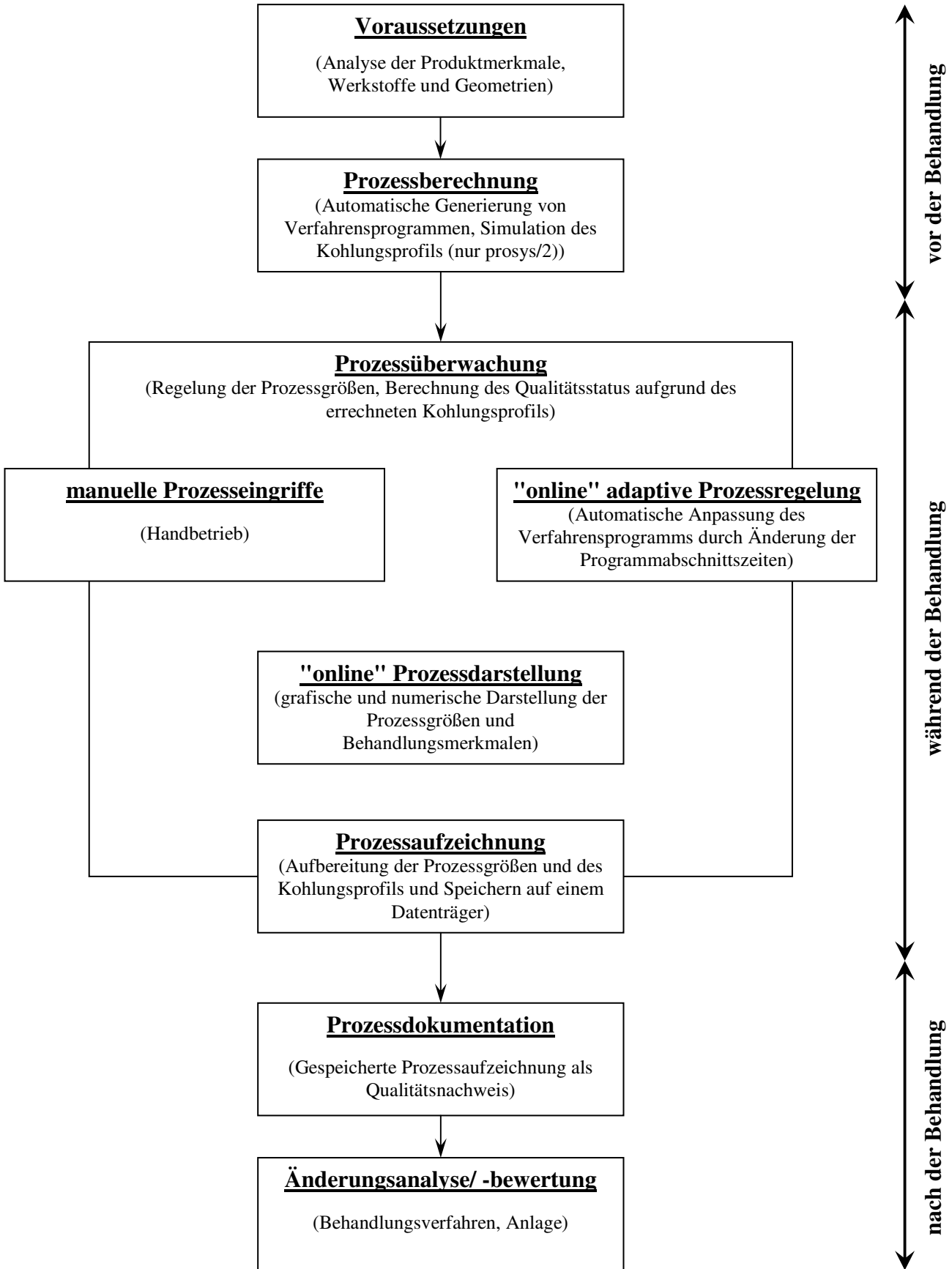


Abbildung 1: Beschreibung des Gesamtprozesses

2. Beschreibung

Der Grundgedanke für dieses Expertensystem war, dass das Erreichen eines hohen Qualitätsniveaus bei vereinfachten Behandlungsabläufen durch den Einsatz preiswerter Technologien mit hohen Rationalisierungspotential und optimaler Anlagenauslastung gewährleistet werden kann. Wichtig war es, ein Verfahren zu finden, welches langwierige und kostspielige Versuchsreihen mit unterschiedlichen Behandlungsprogrammen vermeidet, und sich dennoch auch geänderten Umständen permanent anpasst.

2.1. Vor der Wärmebehandlung

2.1.1. Voraussetzungen

Bei der Programmerstellung für das Aufkohlen und Härten von Werkstücken sind zunächst die Vorgaben zu analysieren, die in das Behandlungsprogramm einfließen. An dem Beispiel "Wärmebehandlung von Zahnrädern" soll die Problemstellung einmal dargestellt werden. Diese hier dargestellten Parameter werden in den jeweiligen Programmparametern des Verfahrensprogramms festgelegt, da hier die Legierungsbestandteile des zu härtenden Werkstückes festgelegt werden, die meist von Werkstück zu Werkstück variieren.

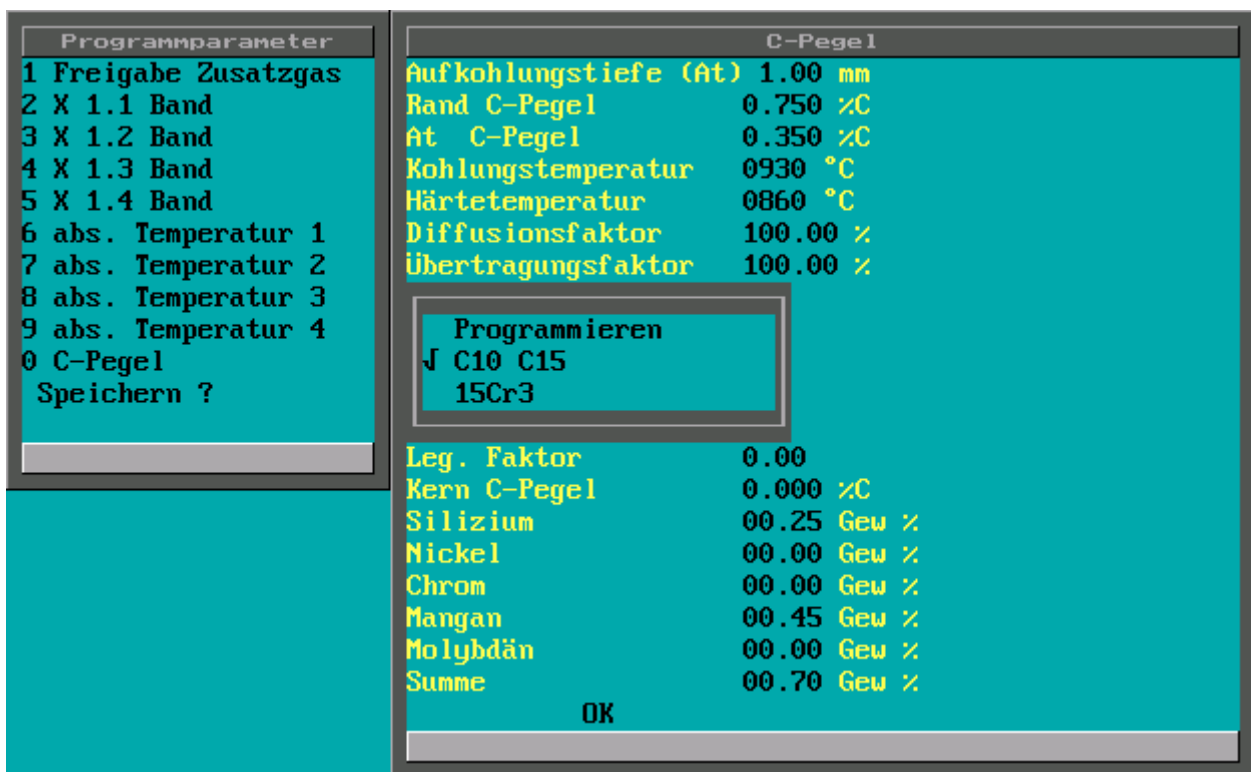


Abbildung 2: Eingabe der Programmparameter

2.1.1.1. Festlegung der Produktmerkmale

Zunächst müssen die Produktmerkmale des Werkstückes, welche dieses nach der Behandlung haben soll, festgelegt werden. Die Fragestellung lautet also, an welchen Bereichen (Zahnfuß, -steg, -spitze) sind für die Anwendung die größten Beanspruchungen vorgesehen? Diffusionsberechnungen basieren auf einer gleichmäßigen Diffusion in ebene Flächen. Nach dem

Fick'schen Gesetz¹ ist das örtliche Konzentrationsgefälle (Diffusionsprofil) proportional einer Anzahl von Atomen, die in einer bestimmten Zeit durch eine senkrecht zum Diffusionsstrom stehenden Fläche diffundieren. Für die Zahnflanken eines Zahnrades gelten diese Bedingungen. Der Diffusionsprozess ist hier unproblematisch berechenbar. Zahnspitzen dagegen haben große Diffusionsflächen. Bei ihnen besteht das Problem des Überkohlens und damit einer möglichen Zerstörung des Werkstückes. Der Zahnfuß stellt ebenfalls eine Problemzone dar. Hier sind die Flächen für eine gleichmäßige Diffusion kleiner. Die Gefahr besteht, dass zu gering aufgekohlt wird und damit nach dem Abschrecken die gewünschte Verschleißfestigkeit nicht erreicht werden kann.

Im Sonderprogramm² lassen sich für das gleichmäßige Aufkohlen bei problematischer Werkstückgeometrie folgende Eingaben vornehmen:

- a) Für das Verschleißkriterium "Zahnfuß" wären der Temperatur- und Diffusionsübertragungsfaktor ("Diffusions-Faktor", "Übertragungs-Faktor") als Korrekturfaktoren geeignet. Werte <100% beeinflussen Haltezeiten bzw. Aufkohlungstemperaturen. Die adaptive Prozessoptimierung benutzt diese Werte als Korrekturfaktoren für die automatische Erstellung von Behandlungsprogrammen, aber auch für die aktuelle Berechnung des Diffusionsprofils im Werkstück (Qualitätsmerkmal) während der Wärmebehandlung.
- b) Bei dem Verschleißkriterium Zahnspitze sind andere Berechnungsdaten, wie z.B. "C-Pegel" oder auch Aufkohlungstiefe zur Anpassung zu berücksichtigen, um Überkohlungseffekte zu vermeiden. Bei niedrigerem C-Pegel können sich weniger Carbide bilden als bei einem höheren C-Pegelgehalt.

2.1.1.2. Werkstoffzusammensetzung (Legierungsbestandteile)

Für den Diffusionsprozess, seine Berechnung und Simulation (unter prosys/2), sind die Daten der Legierungsbestandteile im Stahl wichtige Informationen, da sie unter anderem die Aktivität des Kohlenstoffes im Stahl beeinflussen.

Mangan und Chrom zum Beispiel erniedrigen die Aktivität des Kohlenstoffes. Außerdem lässt sich mit Chrom die kritische Abkühlgeschwindigkeit herunter setzen (erhöhter Wärmetransport im Stahl durch geringeren Wärmeleitkoeffizient λ^3) und damit eine größere Einhärtungstiefe erreichen. Chrom ist wie Molybdän ein Carbidbildner. Mangan vergrößert ebenfalls die Einhärtungstiefe, bildet dagegen aber keine Carbide. Die Legierungszusammensetzung wird hier ebenfalls prozentual angegeben oder kann für verschiedene gängige Stahlegierungen aus einer Datenbank übernommen werden.

2.1.1.3. Kohlungetemperatur

Für die Festlegung der Kohlungetemperatur kommen aufgrund der Löslichkeitsverhältnisse von Kohlenstoff und Eisen für den Aufkohlungsprozess in der Regel nur Temperaturen im Austenitbereich in Frage, da hier das Kristallgefüge "am größten" ist (kubisch-flächenzentriertes Gefüge). Diese Temperaturen zum Aufkohlen liegen meist im Bereich von 900°C bis 950°C. Mit steigender Kohlungetemperatur wird die Diffusionsgeschwindigkeit stark erhöht, was auch auf die Wachstumsgeschwindigkeit der aufzukohlenden Schicht Einfluss nimmt. Damit kann der Aufkohlungsprozess verkürzt werden und wertvolle Prozesszeit eingespart werden. Dagegen wird das Kornwachstumsverhalten der Werkstücke negativ beeinflusst. Ein Mittelwert zur Optimierung muss gefunden werden.

¹ 1. Fick'sches Gesetz: $J = \frac{\partial n(x)}{\partial t} = -Dq \left(\frac{\partial c(x)}{\partial x} \right); i = \frac{l}{q} = zF \frac{J}{q} = -zDF \left(\frac{c^0 - c^s}{\delta_N} \right)$

² "Online"-Diffusionsberechnung

³ Wärmestrom lässt sich berechnen durch: $\dot{Q} = \lambda(x) * \frac{A(x)}{s} * \frac{\Delta T}{dx}$, für Gleichgewicht (zeitunabhängig: $t \rightarrow \infty$)

2.1.1.4. Härtetemperatur

Mit der Härtetemperatur wird die Temperatur festgelegt, von der beim Härtevorgang abgeschreckt werden soll. Dazu sind nach dem Aufkohlungsprozess die Werkstücke auf ein niedrigeres Temperaturniveau abzusenken. Bei bestimmten Stahlsorten wäre die Abschreckgeschwindigkeit, ausgehend von der wesentlich höheren "Kohlungstemperatur", zu langsam, der gewünschte Härteverlauf im Material nicht zu erreichen. Darüber hinaus besteht die Gefahr der Rissbildung und eines erhöhten Verzuges im Werkstück.

2.1.1.5. C-Pegel bei Aufkohlungstiefe (AT) und Rand C-Pegel

Die Einsatzhärtetiefe (EHT) wird als der Abstand von der Oberfläche eines Werkstückes bis zu der Stelle beschrieben, an der ein Härtewert von 550HV⁴ nach dem Härtevorgang vorliegen soll. Dieser Härtewert ergibt sich bei einem C-Gehalt zwischen 0,3% und 0,5% (Standardwert 0,35%) und wird dann erreicht, wenn die vorgegebene Abschreckgeschwindigkeit eingehalten werden kann. Die Aufkohlungstiefe (AT), als Sollwertvorgabe für die Tiefe im Werkstück, an der ein bestimmter C-Pegel erreicht werden soll ("C-Pegel bei AT"), steht in unmittelbarem Zusammenhang zu der EHT, falls der Härtevorgang nach den Vorgaben optimal verläuft (ideale Abschreckgeschwindigkeit). Ist dies nicht der Fall, so kann sich die EHT zu höheren Grenz-C-Pegelwerten verschieben. Mit dem "Rand C-Pegel" errechnet das Programm unter Berücksichtigung der bereits beschriebenen Eingaben ein Diffusionsprofil und kann daraus die Diffusionsabschnitte innerhalb des Verfahrensprogramms erzeugen.

2.1.1.6. Zusammensetzung der Atmosphäre

Die Daten der atmosphärischen Zusammensetzung fließen sowohl in die Berechnung des C-Pegels im Prozessregler, als auch in die Programmerstellung mit ein. Für die C-Pegel-Bestimmung sind die Messwerte der O₂-Sonde, bzw. des CO-Analysators, sowie der Thermoelemente und weiterer, nicht sensorisch erfasster atmosphärischer Größen von Bedeutung. Bei der Simulation eines erstellten Verfahrensprogramms, bei dem keine sensorisch ermittelten Prozessgrößen vorhanden sind und auch bei der "online" Diffusionsberechnung mit Reglern ohne CO-Analysator, ist für die Berechnung der Kohlenstoffübergangszahl " β ", als Maß für die Kohlungsintensität, die Angabe der Bestandteile der Atmosphäre notwendig. Die Zusammensetzung wird prozentual eingegeben oder kann aus einer Datenbank direkt übernommen werden.

⁴ Härteprüfverfahren nach Vickers



Abbildung 3: Eingabe der Zusammensetzung der Atmosphäre

2.1.2. Prozessberechnung

2.1.2.1. Verfahrensprogrammerstellung

Die Erstellung eines Verfahrensprogramms erfordert zunächst die Erstellung eines Ablaufprogrammes. Dieses Ablaufprogramm lässt sich in der symbolischen Programmierung schnell und einfach erstellen. Es reichen im einfachsten Falle 3 Programmabschnitte aus. In diesem Beispiel stellt jeder Programmabschnitt eine Phase des Prozesses dar:

I. Vorbereitungsphase:

Zunächst muss die Prozessphase zur "Vorbereitung des Ofens" eingegeben werden, zum Beispiel das Aufheizen des Ofens auf eine gewünschte Temperatur, um dann mit dem Kohlungsprozess beginnen zu können. Dazu werden die benötigten Eingaben wie in der Bedienungsanleitung des Regelsystems beschrieben, eingegeben. Die Möglichkeiten für Eingaben ergeben sich aus der jeweiligen Konfiguration des Regelungssystems, welche jeweils speziell auf die Behandlungsanlage abgestimmt wird.

II. Kohlungsphase:

In der nächsten Prozessphase wird die Diffusionsautomatik aktiviert. Sollwerte in dieser Phase, wie Temperatur, Abschnittszeit und C-Pegel, können auf 0 gesetzt werden. Diese Werte werden bei der Berechnung des Verfahrensprogramms automatisch aus den zuvor eingegebenen Parametern berechnet. Falls die Werte nicht auf 0 gesetzt sind, werden die eingegebenen Werte im Ablaufprogramm denen aus dem Parametern vorgezogen.

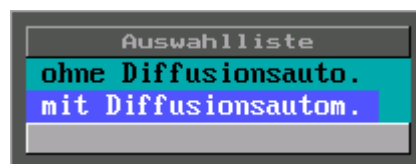


Abbildung 4: Aktivierung der Diffusionsautomatik

III. Härte- und Abschreckphase:

In der letzten Prozessphase müssen die Werte für das Abschrecken eingegeben werden. Diese werden wiederum wie der erste Programmabstein eingegeben. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Diffusionsautomatik nur in einem Programmabschnitt, dem Diffusionsabschnitt, eingeschaltet wird.

Die Programmierung des Ablaufprogrammes könnte dann wie folgt aussehen:

Ofensollwert : DIFF 01:00:00 00:05:00		
1 Stickstoffbetrieb	01:00:00	0:01:00
2 Trägergasbetrieb	00:00:00	0:01:00
3 Programmende	00:05:00	0:01:00

NUM +/- = einfügen/löschen F2 = speichern

Abbildung 5: Beispiel für Abschnitte des Ablaufprogramms

Die einzelnen Programmabschnitte in diesem Beispiel sind folgendermaßen programmiert:

Stickstoffbetrieb	Trägergasbetrieb	Programmende
Rampendauer 01:00:00 hh:mm:ss	Rampendauer 00:00:00 hh:mm:ss	Rampendauer 00:05:00 hh:mm:ss
Speicherzeit 0:01:00 h:mm:ss	Speicherzeit 0:01:00 h:mm:ss	Speicherzeit 0:01:00 h:mm:ss
heizen	heizen	heizen m.Kühlfreiga.
TEMP_SOLLWERT 0800	Trägergasoptionen mit Diffusionsautom.	TEMP_SOLLWERT 0060
Überwachungsauswahl	TEMP_SOLLWERT 0000	C_PEGEL_SOLLWERT 0.00
Stop bis Temp.Band	C_PEGEL_SOLLWERT 0.00	TEMP_SOLLWERT 0060
C-Pegel =0 0.00	mit Zusatzgas	C_PEGEL_SOLLWERT 0.00
	mit Prozessluft	ohne Zusatzgas

Abbildung 6: Sollwerte der einzelnen Programmabschnitte

Nach dem Erstellen des Ablaufprogramms muss dieses noch mit einem Parametersatz zu einem Verfahrensprogramm verknüpft werden. Dieses Verfahrensprogramm kann nun in den Arbeitsspeicher des Regelungssystems geladen werden und würde zum Beispiel folgenden einen Verlauf darstellen:

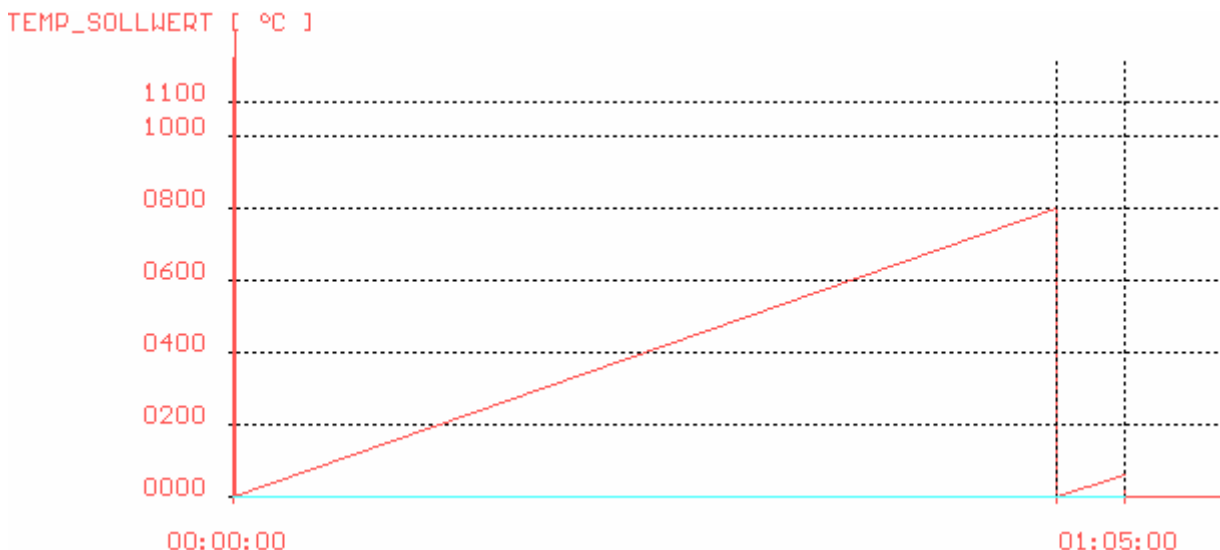


Abbildung 7: Prozessverlauf vor der Diffusionsberechnung

In dieser Abbildung entspricht die rote Linie dem programmierten Sollwerttemperaturverlauf und die blaue dem Sollwert-C-Pegel-Verlauf. Zu erkennen sind hier die drei Programmabschnitte, wobei im Diffusionsabschnitt alle Sollwerte auf 0 gesetzt sind.

Nachdem die Berechnung der Diffusionsabschnitte durchgeführt wurde, sieht der Verlauf der Sollwerte in diesem Beispiel wie folgt aus:

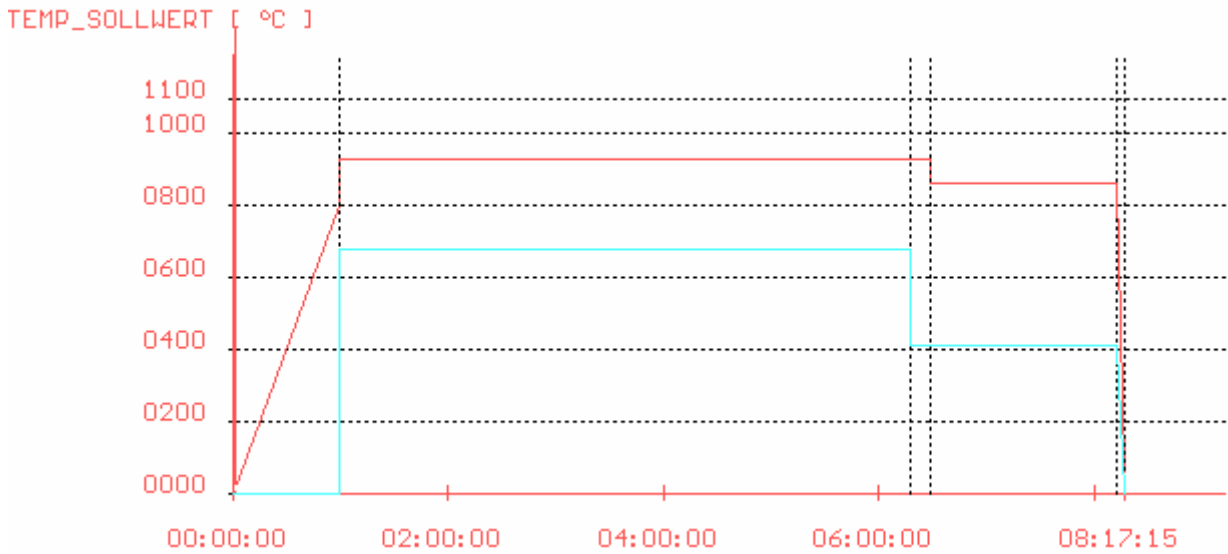


Abbildung 8: Prozessverlauf nach der Diffusionsberechnung

Dies ist nun das fertige Verfahrensprogramm, welches als Sollwertvorgabe für den eigentlichen Behandlungsprozess genutzt wird. Zu erkennen ist, dass durch die automatische Berechnung, mit den Vorgaben aus den Parametern, 5 weitere Programmabschnitte hinzugefügt worden sind. Dadurch, dass in den Parametern als Härtetemperatur eine andere Temperatur als die Kohlungetemperatur angegeben ist, ist im 6. Abschnitt die Sollwerttemperaturabsenkung auf die Härtetemperatur zu erkennen. Von dieser Temperatur wird dann am Ende des Verfahrensprogramms abgeschreckt. Man spricht hier von einem "Programm mit Temperaturabsenkung". Auf diese Problematik wurde bereits im Kapitel 2.1.1.4 hingewiesen.

Wenn die Härtetemperatur gleich der Kohlungetemperatur ist, werden durch die automatische Diffusionsberechnung nur 3 Programmabschnitte hinzugefügt. Man spricht von einem "Programm ohne Temperaturabsenkung". Der Verlauf der Sollwerte in diesem Beispiel, bei ansonsten gleichen Parametern, sieht wie folgt aus:

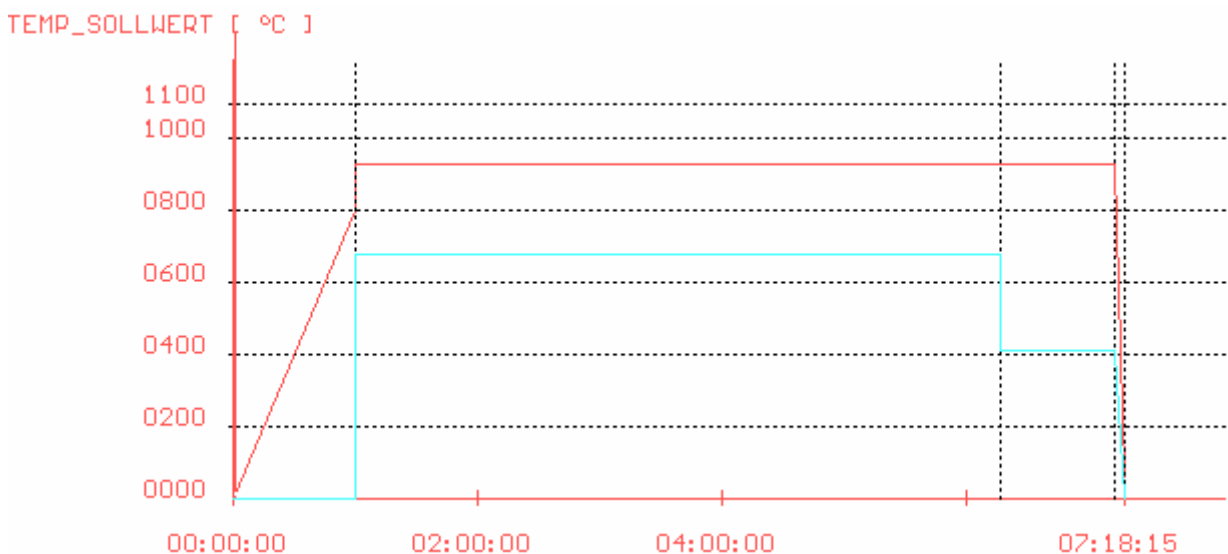


Abbildung 9: Prozessverlauf ohne Temperaturabsenkung

2.1.2.2. Bestimmung der Carbidgrenze und -regelung

Carbide entstehen bei Überkohlung von Werkstücken speziell in den Bereichen, in denen große Diffusionsflächen (siehe Beispiel Zahnrad) vorhanden sind. Sie können Werkstoffe unbrauchbar machen und lassen sich, wenn überhaupt, nur mit großem wärmetechnischen Aufwand lösen. Es existieren unterschiedliche Methoden, um Carbide regelungstechnisch zu verhindern:

a) Regelung des Rand-C-Pegels

Bei dieser Methode wird messtechnisch der C-Pegelgehalt im Randbereich des Werkstückes gemessen. Der Bediener muss dafür manuell eine Carbidgrenze (maximal erlaubter C-Pegelgehalt) vorgeben. Das bedeutet, das Werkstück wird ständig im gefährdeten Bereich für die Entstehung von Carbiden geregelt. Man versucht hiermit die Prozesszeit durch überhöhten C-Pegel und den damit beschleunigten Diffusionsprozess zu minimieren.

b) Regelung des C-Pegels der Ofenatmosphäre

Das Expertensystem arbeitet mit einer atmosphärischen Messmethode. Dies bedeutet, dass das Sonderprogramm mit Eingabe der Legierungsbestandteile, der Härte-, bzw. Kohlungstemperatur und einem Carbid-Faktor⁵ die Carbidgrenze für ein Werkstück errechnet und diese als C-Pegelsollwert der Ofenatmosphäre für die Dauer des Überkohlens bis zum Umschaltunkt (C-Pegelabsenkung) festlegt. Die Praxis und etliche Versuchsreihen mit Werkstücken unterschiedlichster Legierungen und Geometrien haben gezeigt, dass der Carbid-Faktor und die Differenz zwischen C-Pegel der Atmosphäre und dem C-Pegel im Randbereich eines Werkstückes, der je nach Legierung variieren kann und daher nicht absolut festzulegen ist, den Prozess in jedem Falle unterhalb des gefährlichen Carbidbereiches halten. Die Prozesszeit wird auch hierfür durch das Expertensystem berechnet.

2.2. Während der Wärmebehandlung

2.2.1. Prozessüberwachung

Beim Start des Verfahrensprogramms werden gemäß den Sollwerten und den Programmfunktionen (Steuerspuren) die Istwerte durch das Regelungssystem geregelt. Die aktuellen Prozessgrößen werden zu jeder Zeit so aufbereitet, dass der Bediener ständig den laufenden Prozess überwachen kann. Je nach Anlage und Konfiguration stehen Anlagenvisualisierungen, numerische Anzeigen, Trendanzeigen und die Schreiberaufzeichnungen zur Verfügung. Manuelle Eingriffe in den laufenden Prozess sind jederzeit durch den Bediener möglich, soweit die einstellbaren Berechtigungen des Bedieners dies zulassen.

2.2.2. "online" adaptive Prozessregelung

Im Gegensatz zu dem Standard Prozessablauf, bei dem nach dem Prozesstart nur noch manuelle Eingriffe das Verfahrensprogramm verändern, wird das Aufgabenspektrum des Regelungssystems durch die Integration des Sonderprogramms zur automatischen Diffusionsberechnung erweitert. In den Programmabschnitten, die ohne Diffusionsautomatik⁶ programmiert sind, führt das Regelungssystem den Prozess, indem es notwendige Abschnittsverlängerungen⁷, die für eine Prozessoptimierung erforderlich sind, mit Hilfe von Grenzwerten (Bandbreiten) und Steuerspuren. In den Abschnitten mit Diffusionsautomatik, die bei der Berechnung des Verfahrensprogrammes erstellt worden sind, errechnet das Regelungssystem im Minutentakt aus den aktuellen Prozessgrößen die aktuellen Qualitätsmerkmale (Diffusionsprofil), zeigt dieses im Diffusionsschreiber "online" an und greift nach folgenden Kriterien adaptiv ein:

⁵ Korrekturwert in Abhängigkeit des Legierungsfaktors

⁶ Nur in der ersten und letzten Prozessphase

⁷ z.B. unterschiedliche Aufheizzeiten bei unterschiedlichen Chargengewichten

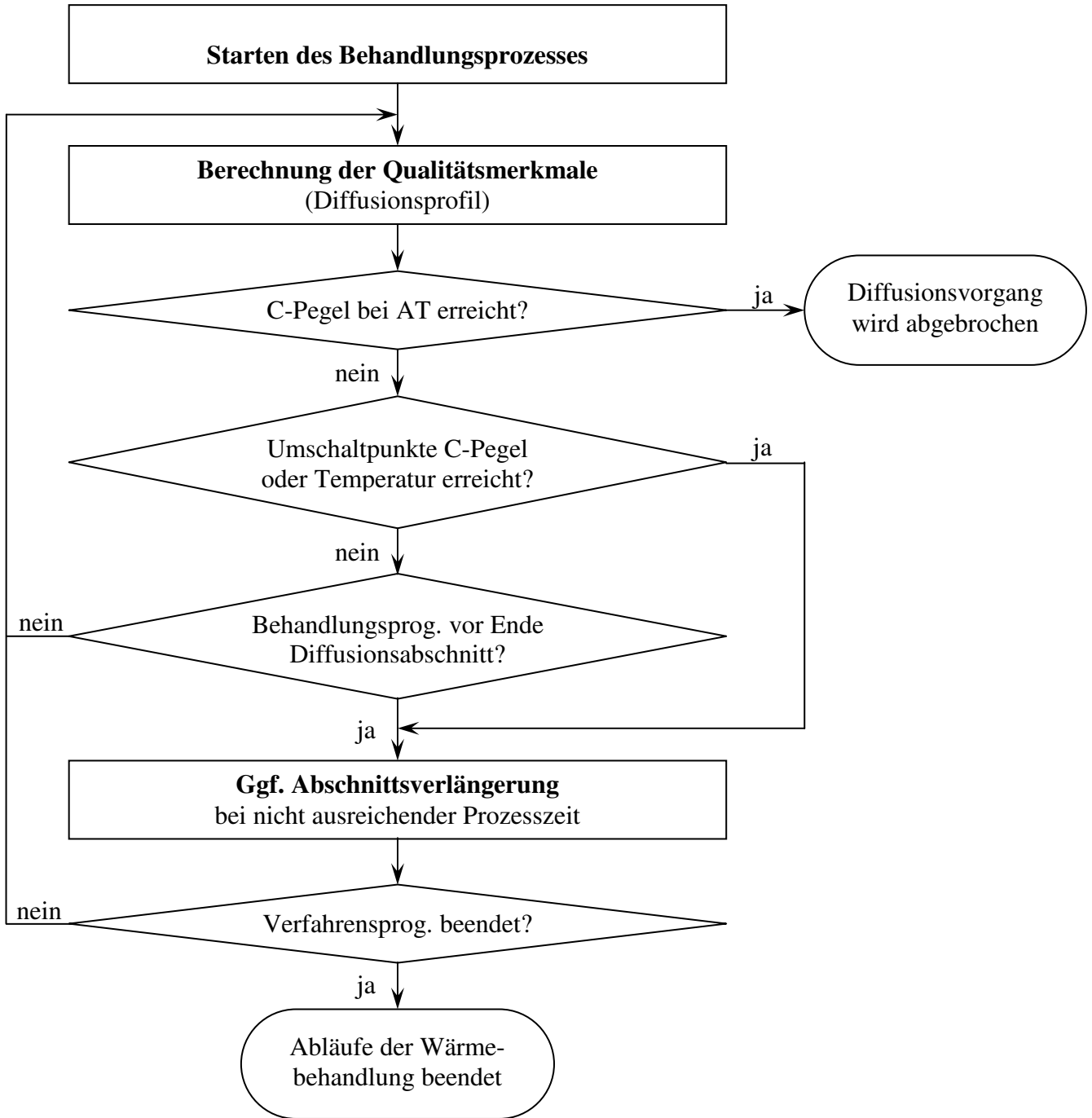


Abbildung 11: Arbeitsweise der Diffusionsautomatik

- a) Aus der aktuellen Berechnung geht hervor, dass der Umschaltpunkt für die Absenkung des C-Pegels, bzw. der Temperatur erreicht worden ist
 Die Umschaltunkte sind die (Zeit)-Punkte, zu denen der C-Pegel zum Abkühlen der Randbereiche oder die Temperatur zum Abkühlen auf die Härtetemperatur, abgesenkt werden. Diese sind bei der automatischen Programmerstellung aus den eingegebenen Parametern berechnet worden. Um den C-Pegelgehalt bei entsprechender AT in möglichst kurzer Zeit erreichen zu können, wird, wie bereits beschrieben, mit einem höheren C-Pegelwert aufgekohlt, als für den vorgegebenen Rand-C-Pegelwert notwendig ist. Dies bedeutet, dass im

weiteren Behandlungsverlauf die C-Pegelatmosphäre im Ofen so weit absinken muss, dass der Rand-C-Pegel auf den gewünschten Wert abkühlen kann. Dieser Umschaltzeitpunkt errechnet sich aus der Diffusionsgeschwindigkeit, dem angelegten C-Pegel in der Ofenatmosphäre und der Tatsache, dass selbst nach Absenken des C-Pegels eine Diffusion des Kohlenstoffes in das Werkstückinnere in einem gewissen Rahmen weiterhin stattfindet. Aufgrund von Störeinflüssen, wie zum Beispiel überhöhter Temperatur oder C-Pegel, kann dieser (Umschalt)-Punkt vor der ursprünglich errechneten Zeit erreicht werden. Das Regelungssystem erkennt diese Situation und verändert entsprechend die Abschnittszeiten des Programms. Der Abschnitt mit dem überhöhten C-Pegel ist nun so weit gekürzt, sodass das Programm unmittelbar in den nächsten Abschnitt (abgesenkter C-Pegelwert) übergeht. Entsprechend wird mit Erreichen des Umschaltpunktes für die Temperaturabsenkung auf Härtetemperatur verfahren.

b) Der Behandlungsprozess steht vor dem Ende eines Diffusionsabschnittes

Kurz vor dem Ende eines jeden Diffusionsabschnittes errechnet das Expertensystem aus den "online" Diffusionsberechnungen die Diffusionsabschnitte neu. Anlagenstörungen, wie zum Beispiel niedrige C-Pegel und Temperaturwerte, die den Behandlungsprozess verzögert haben, veranlassen eine Verlängerung des aktuellen Diffusionsabschnittes. Wiederum wird dieser Diffusionsabschnitt neu berechnet und automatisch die Abschnittszeiten verlängert. Dies hat zur Folge, dass der Zeitabschnitt verlängert wird, bis der gewünschte Behandlungseffekt erreicht ist. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis die Wärmebehandlung erfolgreich abgeschlossen ist und in den nächsten Behandlungsabschnitt übergegangen werden kann.

c) Die Aufkohlungstiefe ist erreicht worden

Wenn die permanenten "online" Diffusionsberechnungen ergeben, dass aufgrund unvorhergesagter Einflüsse die optimale Aufkohlungstiefe erreicht worden ist, wird unabhängig vom aktuellen Programmstand das Verfahren sofort abgebrochen. Ein gleichzeitig neu berechnetes und aktiv gesetztes Verfahrensprogramm veranlasst die Weiterführung der Wärmebehandlung im nächsten Abschnitt. Hierdurch wird eine Überschreitung des zulässigen C-Pegels in der AT vermieden, die das Werkstück gegebenenfalls unbrauchbar machen könnte.

2.2.3. "online" Prozessdarstellung

Während des laufenden Prozesses kann sich der Bediener zu jedem Zeitpunkt den aktuellen Wärmebehandlungsstand anhand des Diffusions- und Temperaturschreibers darstellen lassen. Dazu werden abhängig vom Anlagentyp, der Konfiguration des Regelungssystems und den Betriebsanforderungen alle Prozessgrößen und Anlagenzustände grafisch und numerisch dargestellt. Das Expertensystem stellt dafür den Stand der Wärmebehandlung als Diffusionsprofil (im Diffusionsschreiber) aus den Berechnungen, die im Minutentakt durchgeführt werden, zur Verfügung.

2.2.4. Prozessaufzeichnung

a) Die Aufzeichnung und Aufbereitung von Prozessgrößen erfolgt nach verfahrenstechnischen, anlagen- und kundenspezifischen, sowie letztendlich nach den von der Qualitätssicherung geforderten Gesichtspunkten.

Bei der direkten Aufzeichnung werden die unmittelbar gemessenen Prozessgrößen (Istwerte) und deren zugeordnete Sollwerte, sowie Anlagenzustände auf dem internen Datenträger des Regelungssystems gespeichert. Diese Daten können aber auch zusätzlich durch Verrechnungsalgorithmen (z.B. für die Mittelwertbildung von Messwerten mehrerer Chargenthermoelemente) aufbereitet und abgelegt werden.

2.3. Nach der Wärmebehandlung

2.3.1. Prozessdokumentation

Die Prozessrekonstruktion zählt heute zu den wichtigsten Nachweisen von Qualitätsmerkmalen, sowie fehlerfrei durchgeführter Prozessverläufe. Diese Nachweise sind wichtige Dokumente für Kunden, bzw. nachfolgende Abteilungen (Fertigungsstationen). Sie dienen unter anderem der Beweisführung bei Materialschäden mit den daraus möglicherweise resultierenden Regressansprüchen der Kunden. Dies gilt auch bei zum Beispiel Rückweisungen von Losen in der Wareneingangskontrolle. Darüber hinaus lassen sie sich bei der Qualitätssicherung und bei dessen Werkzeugen für die Fehlerverhütung wie z.B. bei FMEA-Studien, sowie bei Verfahrensaudits einsetzen.

Außerdem fließen die Ergebnisse mit in die Änderungsanalyse ein und bewirken je nach Aufwand und Wichtigkeit Verbesserungen bei den Parametereinstellungen, Verfahrensprogrammen und Atmosphärenzusammensetzungen, sowie den Anlagenkomponenten wie Mechanik, Messsysteme, Steuerung und ggf. Modernisierung.

3. Simulation des Behandlungsverlaufs (nur Prozessleitsystem prosys/2)

In der modernen Qualitätssicherung werden im verstärkten Maße fehlerverhütende Maßnahmen eingesetzt, im Gegensatz zur bisherigen "Gut-Schlecht-Kontrolle" nach dem Fertigungsprozess. Daher werden die vom System generierten oder manuell eingegebenen Verfahrensprogramme vor Beginn des eigentlichen Behandlungsprozesses des Werkstückes durch eine Computersimulation überprüft. Hierdurch besteht die Möglichkeit, durch Veränderung der Parameter den Prozessablauf noch zu beeinflussen.

Nach Auswahl eines Verfahrensprogramms oder der Kombination eines Ablaufprogramms und einer Parameterdatei kann nun der zu erwartende Verlauf der Diffusion simuliert werden. Hierdurch wird aus den Parametern und den Programmdatei der zu erwartende Diffusionsverlauf berechnet und grafisch angezeigt.

```
[ Kammerofen I ]
Verfahrens-Prg.: 071805
Bezeichner      : Einsatzhärten 1.0718 9SMn28K 0.5 mm auto
Nr.             : 142002
Programm        : 071505
Parameter       : 071805
```

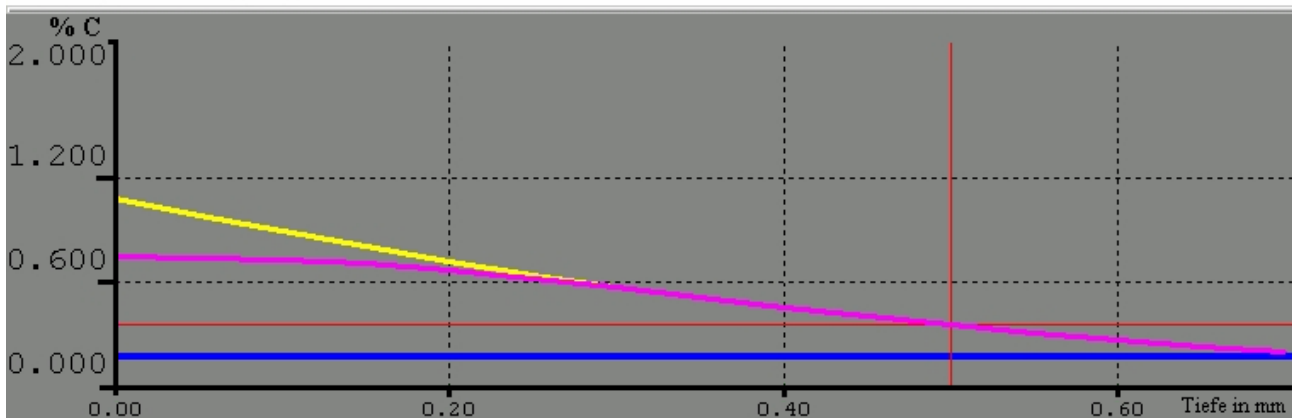


Abbildung 10: Diffusionssimulation von prosys/2

Dabei sind die Kurven folgendermaßen zu interpretieren:

- Blaue Kurve: Kern C-Pegel im Material
- Gelbe Kurve: max. Kohlenstoffprofil im Material, mit anfänglicher Überkohlung

- Lila Kurve: tatsächliches Kohlenstoffprofil im Material
Rote Linie (Senkr.): Sollaufkohlungstiefe
Rote Linie (waager.): C-Pegel bei Aufkohlungstiefe/ AT C-Pegel/ Grenz-C-Pegel

Man kann während der Simulation bereits deutlich erkennen, wie mit erhöhtem C-Pegel der gewünschte C-Pegelgehalt in der Aufkohlungstiefe (AT) in optimaler (verkürzter) Zeit erreicht wird und im letzten Abschnitt durch Absenken des C-Pegels der Randbereich auf den vorgegebenen Wert abgekohlt wird.

Die Simulation zeigt den Verlauf des Diffusionsprofils während der C-Pegelüberhöhung und den Verlauf nach der Behandlung mit abgesenktem C-Pegel. Der Werkstoffexperte kann nun das S-förmig verlaufende Profil mit den numerisch aufgeführten Daten⁸ bewerten. In den meisten Fällen lassen sich dadurch kostspielige Versuchsreihen einsparen. Bei speziellen Werkstücken, wie z.B. Einzelanfertigungen, sind Versuchsreihen meist gar nicht erst möglich.

Die Simulation wird für einen optimalen Prozessverlauf durchgeführt. Störgrößen, die den Verlauf der Wärmebehandlung beeinflussen können, müssen vom System erkannt werden und lassen zeitliche Länge und auch Sollwerte in den Abschnitten variieren.

Durch die Simulation wird ebenso wie im Regelungssystem das Verfahrensprogramm durch 3, bzw. 5 weitere Programmabschnitte erweitert. Diese können jetzt manuell verändert werden, um einen anderen Kohlungsverlauf zu erhalten. Die Änderungen in den Parametern, bzw. im Ablaufprogramm können durch eine erneute Simulation grafisch dargestellt werden. Nachdem nun das gewünschte Ergebnis vorliegt, kann dieses Verfahrensprogramm nun an das Regelungssystem übertragen werden. Hier findet nun die adaptive "online" Regelung wie unten beschrieben statt. Über das Leitsystem besteht jederzeit die Möglichkeit, die aktuellen Aufzeichnungsdaten, sowie den Programmverlauf am Regelungssystem einzusehen.

4. Zusammenfassung

Das Sonderprogramm zur automatischen Diffusionsberechnung (Optimierung),

- *erstellt vor der Wärmebehandlung*
automatisch das Verfahrensprogramm anhand von Parametern und simuliert das Diffusionsprofil von dem Verfahrensprogramm (nur Prozessleitsystem prosys/2),
- *stellt während der Wärmebehandlung,*
grafisch das Diffusionsprofil "online" dar und stellt die adaptive Prozesskontrolle mit automatischer Verfahrensoptimierung sicher,
- *lässt nach der Wärmebehandlung*
die Rekonstruktion der Wärmebehandlungsprozesse aus den aufgezeichneten Messwerten zu.

⁸ Berechnete Sollwerte in den Diffusionsabschnitten des Verfahrensprogramms

5. Glossar

Ablaufprogramm	Durch den Bediener erstelltes Programm, welches das Regelungssystem abarbeitet.
Anlagenvisualisierung	Grafische Darstellung der Anlage mit Überblick über die wesentlichen Prozesswerte.
Aufkohlungstiefe	Senkrechter Abstand des Punktes von der aufgekohlten Werkstückoberfläche, an dem der Kohlenstoffgehalt einen festgelegten Grenzwert erreicht.
Behandlungsprogramm	siehe Verfahrensprogramm
Carbide	Diese entstehen bei Überkohlung von Werkstücken speziell in den Bereichen, in denen große Flächen vorhanden sind. Sie können Werkstoffe unbrauchbar machen.
C-Pegel	Es wird eine kontrollierte, kohlenstoffhaltige Atmosphäre im Ofen erzeugt. Der C-Pegel ist ein Maß für die Aufkohlungswirkung des Aufkohlungsmittels bzw. der Aufkohlungsatmosphäre. Er kennzeichnet das Aufkohlungspotential des Aufkohlungsmittels gegenüber reinem Eisen.
Diffusionsprofil	Verlauf der Konzentration des in die Oberfläche des Materials diffundierten Kohlenstoffes.
Einsatzhärtetiefe (EHT)	Definition der Tiefe des zu härtenden Materials, bei der noch eine Härte von 550HV vorliegen soll.
Härte	Die Härte eines Materials kann in unterschiedlichen Verfahren gemessen und definiert werden. Die gängigsten Verfahren sind nach Brinell (HBW), Vickers (HV) und Rockwell (HRB, bzw. HRC).
Kerbschlagzähigkeit	Die Kerbschlagzähigkeit ist ein Maß für die Fähigkeit des Werkstoffes, Stoßenergie und Schlagenergie zu absorbieren, ohne zu brechen
Kern C-Pegel	Durch Legierungsbestandteile im gesamten Material vor dem Aufkohlen vorhandener Kohlenstoffanteil.
Kohlenstoffaktivität	Potentialunterschied zwischen der Kohlenstoffkonzentration in der Kohlungsatmosphäre und dem aufzukohlenden Material.
Kohlenstoffübergangszahl	Verschiedene Aufkohlungsreaktionen laufen mit sehr unterschiedlichen Geschwindigkeiten ab. Bei der Beschreibung der Aufkohlungskinetik werden diese Reaktionen zusammengefasst durch die Kohlenstoffübergangszahl β beschrieben.
Kohlungsprofil	siehe Diffusionsprofil
Manuelle Eingriffe	Bewusste manuelle Veränderung der Soll- und Ist-Werte im laufenden Prozess.
metastabiler Gefügestand	Nicht stetiger Gefügestand von Stahl, z.B. Austenit. Dieser wandelt sich beim Abkühlen in z.B. Martensit oder Bainit um.
numerische Anzeige	Anzeige der aktuellen Prozessdaten als Zahlenwerte

Diffusionsautomatik	Ständige Anpassung des aktuellen Behandlungsprogramms an den laufenden Prozess.
Programmparameter	Materialdaten (u.a. Legierungszusammensetzung) der Charge und mögliche Bandbreiten für die Wärmebehandlung.
Verfahrensprogramm	Ladbares Programm im Regelungssystem. Besteht aus einem Ablaufprogramm und einem Programmparameter.
Streckgrenze	Spannung, die bei der Fließen von Stahl einsetzt, ohne dass die anliegende Spannung weiter erhöht wird. Kommt es bei Fließbeginn sogar zu einem Spannungsabfall, zeigt der Werkstoff eine obere und eine untere Streckgrenze. Diese werkstoffspezifische Größe wird im Zugversuch ermittelt.
Schreiberaufzeichnungen	Grafische Darstellung der aufgezeichneten Messwerte des aktuellen Prozesses. Nach Beendigung des Prozesses werden diese Daten gespeichert und können als Qualitätsnachweis ausgedruckt und archiviert werden.
Systemparameter	Bei jedem Verfahrensprogramm gültige Parameter, z.B. Regelparameter und Endogaszusammensetzung.
Trendanzeige	Anzeige des aktuellen Soll- Ist-Wertvergleiches und Darstellung als Balkendiagramm.
Überkohlen	Zu große Anreicherung mit Kohlenstoff, Gefahr von Carbidbildung.
Zugfestigkeit	Die Zugfestigkeit eines Materials ist die maximal aufnehmbare Zugspannung (Zugkraft/Fläche), die über Zugversuche bestimmt werden kann.