

M. Lenz

**Institut für Energieübertragung und
Hochspannungstechnik
Universität Stuttgart**

U. Sundermann

**RWE Energie AG
Essen**

Stufenschalter werden seit über 80 Jahren in Transformatoren eingebaut. Sie dienen der Änderung des Übersetzungsverhältnisses unter Last um Spannung, Wirk- und Blindleistung in elektrischen Netzen dem Bedarf anzupassen.

Transformatoren werden konstruktiv für eine Betriebszeit von 25 bis 35 Jahre ausgelegt, wobei heute Transformatoren mit 40 und mehr Betriebsjahren keine Seltenheit sind. Zur Erhaltung der Betriebssicherheit des Stufenschalters trägt eine systematische Wartung bei.

Die Wartung des Stufenschalters ist eine vorbeugende Instandhaltungsmaßnahme. Ihre Intervalle sind abhängig von einer Vielzahl von Kriterien; typische Betriebszeiten liegen in der Größenordnung 6-8 Jahre, für die Schaltzahlen existiert eine Bandbreite von 20.000-100.000 Schaltungen. Diese Wartungskriterien sind mitverantwortlich für die hohe Betriebszuverlässigkeit der Stufenschalter.

Während der Inspektion der Stufenschaltereinrichtung wird der Lastumschalter und dessen Komponenten gewartet. Der Wähler ist dagegen unzugänglich im Kessel untergebracht. Um über dessen Zustand während der Wartung ebenfalls eine Aussage zu erhalten wird am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik in Zusammenarbeit mit der RWE Energie AG ein Monitoring-System für diesen unzugänglichen Bereich entwickelt. Es dient der Erweiterung der vorbeugenden Lastumschalterinspektion.

Das in diesem Bericht vorgestellte System beschränkt sich auf die Messung der Leistungsaufnahme des Antriebsmotors während einer Stufung. Seine kompakte und portable Ausführung eignet sich sowohl als autarkes Meßsystem für die Off-Line-Messung (z.B. im Rahmen der routinemäßigen Lastumschalterinspektion) als auch als intelligente Komponente eines übergeordneten Transformator-Monitoring-Systems.

1 Monitoring-System

Mit dem modularen Monitoring-Konzept wurden Erfahrungswerte in die Praxis umgesetzt, die aus mehreren Versuchen gewonnen wurden. Konzeptionell zeichnet sich das System durch ein nach Funktionseinheiten modularisierten Sensorkonzept aus. Forderungen nach kompaktem und berührungssicherem Aufbau werden erfüllt.

Das Monitoring-System bildet die Basis folgender Anforderungen:

- Dokumentieren des bisherigen Betriebes des Stufenschalters bei On-Line-Betrieb
- Beschreiben des gegenwärtigen Betriebszustandes
- Erkennung von sich anbahnenden Fehlern
- Gesteigerte Verfügbarkeit des Betriebsmittels
- Flexibler Einsatz des Systems

Der Nutzen eines Monitoring-Systems besteht nicht nur in der Aufzeichnung betriebsrelevanter Parameter sondern auch dem Gewinnen interessierender Nutzinformationen aus einer Vielzahl von weniger informativen Einzelinformationen. Das Hauptaufgabengebiet dieses Systems besteht in dem Erkennen von Fehlern, die zu einem vollständigen Ausfall des Stufenschalters führen.

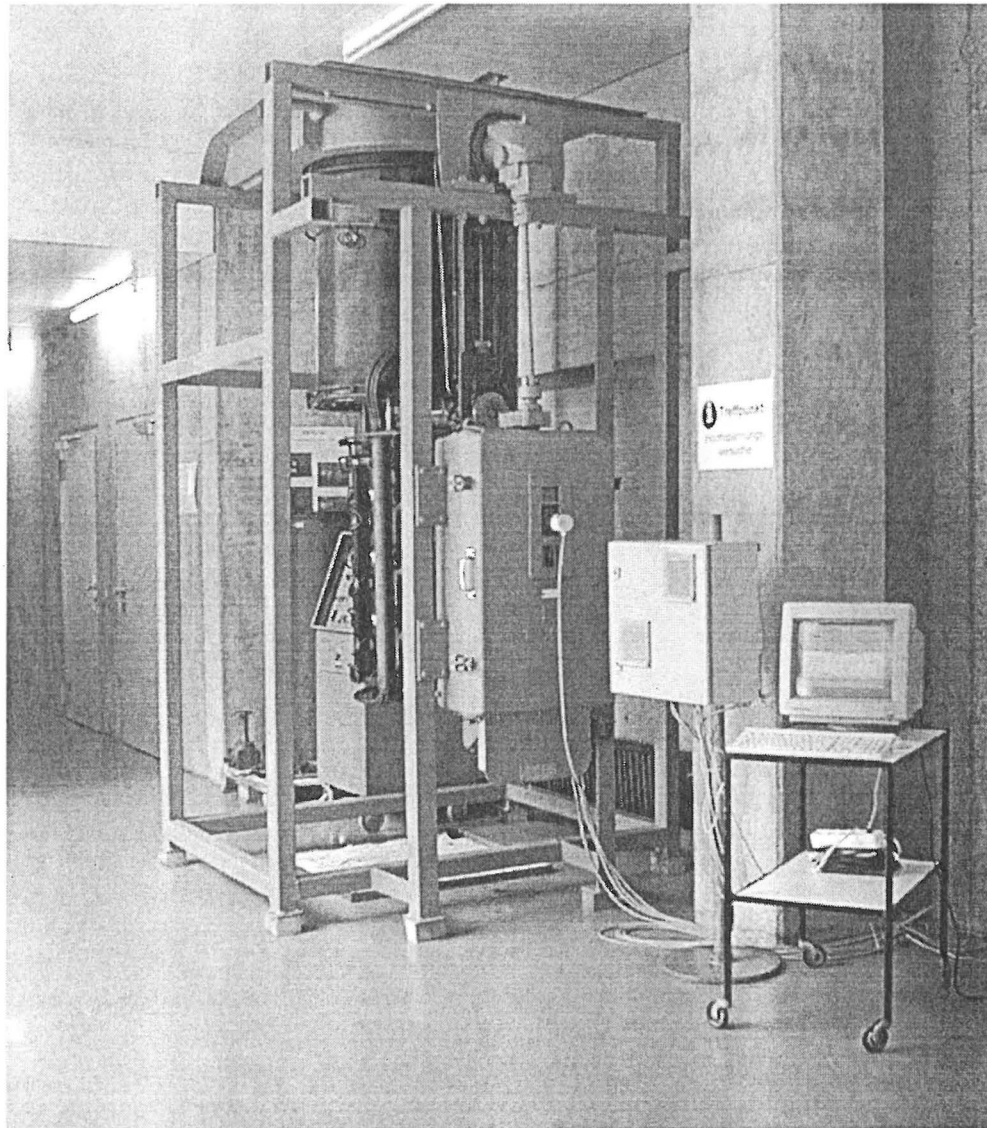


Abbildung 1.1:
Versuchsaufbau und
Monitoring-System

1.1 Aufbau

Das Monitoringsystem ist in einem Schrank der Schutzart IP 55 untergebracht und kann je nach Anwendungsfall am oder in der Nähe des Transformators installiert werden. Es wird über ein Kabel mit dem jeweiligen Motorantrieb verbunden. Einen Eindruck des realisierten Labormusters zeigt Abbildung 1.1. Durch Zwangsbelüftung und Heizung ist das Monitoringsystem auf die unterschiedlichsten Betriebsbedingungen vorbereitet.

Das Stufenschalter-Monitoring-System besteht aus drei Einzelkomponenten (s. Abbildung 1.2):

- PC zur Verarbeitung der Meßwerte,
- Module zur Digitalisierung der Meßdaten und Steuerung des Antriebes,
- Sensoren zur Aufnahme der Meßgrößen.

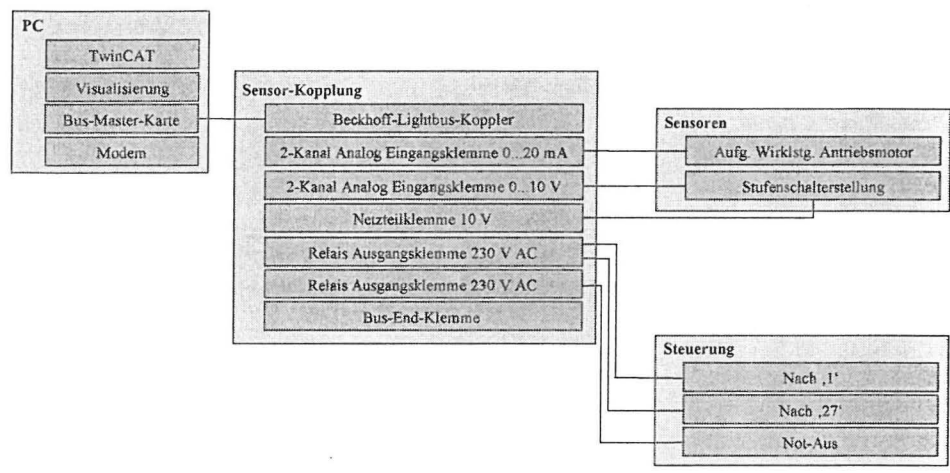


Abbildung 1.2:
Aufbau des
Stufenschalter-
Monitoring-Systems

Die Hauptkomponente des System bildet ein PC zur Speicherung und Bewertung der Meßdaten. Wird das System für die Off-Line-Messung verwendet, kann er die Visualisierung der Meßdaten und die Steuerung des Stufenschalters übernehmen. Die Erfassung der Meßdaten erfolgt mittels einer Echtzeit-Kernel-Extension für Windows NT über den PC. Dieser Kernel bietet eine genaue Zeitbasis (harte Echtzeit mit max. +/- 15 μ s Jitter), der mit höchster Priorität die Meßdaten unabhängig von anderen Prozessoraufgaben erfaßt. Für Speicherung, Visualisierung und Diagnose der Meßdaten läuft parallel zur Meßdaten-Erfassung ein Programm, das zusätzlich die Steuerung des Stufenschalters für die Off-Line-Messung beinhaltet.

Wird das System für die On-Line-Messung verwendet kann es mit einem Modem für den Daten-, Parameter- und Meldungs austausch nachgerüstet werden.

Über eine Lichtwellen-Leiter-Verbindung ist der PC mit der Sensorkopplung bzw. den Steuerrelais verbunden.

Es sind folgende Sensoren (s. Abbildung 1.3) für

- aufgenommene Wirkleistung des Antriebsmotors und
- Stufenschalterstellung

integriert. Falls erforderlich können zusätzliche Sensoren nachgerüstet werden.

Aufg. Wirkleistung Antriebsmotor

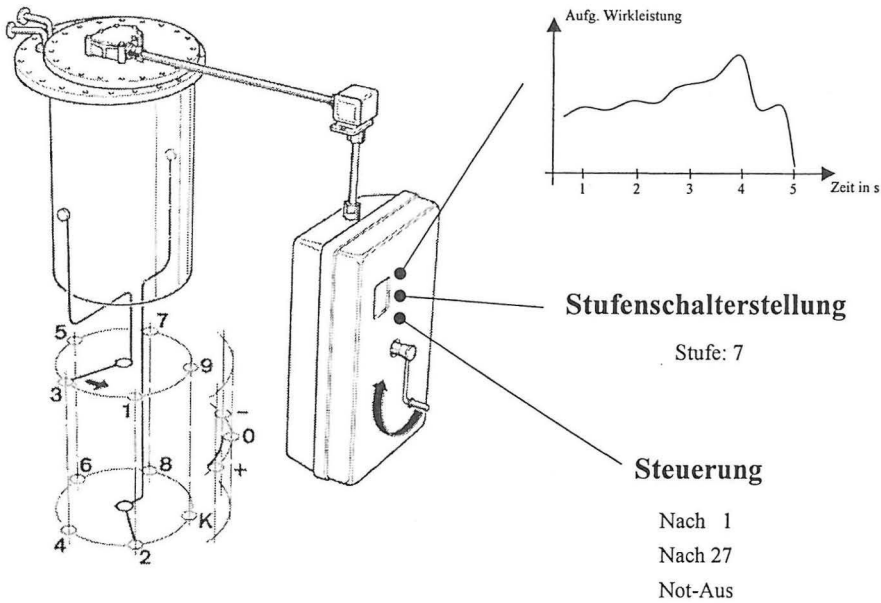


Abbildung 1.3:

Sensoren des
Monitoring-Systems
und Steuerung

Die Messung des vom Motorantrieb an den Stufenschalter abgegebenen Drehmomentes erfolgt indirekt durch Bestimmung der aufgenommenen Motorwirkleistung. Sie wird über einen Wirkleistungsmeßumformer AD-LU 410 GA der Firma Adamczewski bestimmt, dessen Einschwingzeit 50 ms beträgt.

Die Stufenschalterstellung wird über die Widerstandsbahn des Stufenschalter-Antriebs ermittelt. Hierzu wird sie mit einer Spannung von 10 V beaufschlagt. Je nach Schalterstellung verändern sich die Widerstandsverhältnisse; die abfallende Spannung ist ein Maß für die Stellung.

Die Steuerung umfaßt das Stufen nach 1 bzw. nach 19 (27) und ein Not-Aus um den Antrieb stillzulegen.

1.2 Stufenschalter-Monitoring-Software

Die Software besteht aus zwei getrennten Programmen, die auf dem im Monitoring-System integrierten PC ablaufen:

- Abfrage der Meßwerte und
- Speicherung, Visualisierung und Beurteilung der Meßdaten.

Das Programm für die Abfrage der Sensordaten nutzt den Echtzeit-Kernel. Dieser Kernel garantiert die exakte zeitliche Abfrage der Sensoren. Ebenso versieht er die Daten mit einem Zeitstempel.

Die Software zur Speicherung, Visualisierung und Beurteilung der Meßdaten nutzt das Betriebssystem Windows® NT und bedient sich über Kommunikation mit der Abfragesoftware der Sensordaten. Neben den Überwachungsalgorithmen sind auch Methoden zur Steuerung des Schalters integriert. Mit Hilfe des optionalen Modems kann von außerhalb auf dieses Programm zugegriffen werden.

Abbildung 1.4 zeigt das Hauptfenster des Programmes, das einen schnellen Überblick der wichtigsten Daten liefert. Zusätzliche Daten können über Menüfunktionen abgerufen werden.

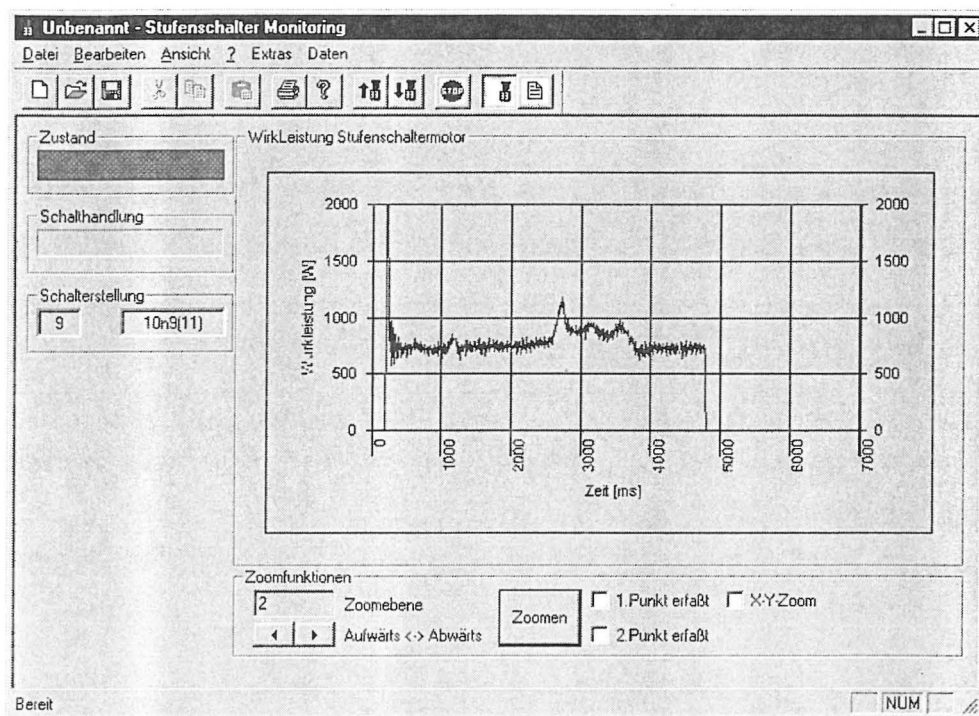


Abbildung 1.4:

Hauptfenster des Programms zur Speicherung, Visualisierung und Bewertung der Meßdaten

Die Aufzeichnung der Meßdaten wird über die Wirkleistung des Motors getriggert. Nach Beendigung der Schalthandlung werden die Sensordaten mit einem Zeitstempel versehen und abgespeichert. Diesem Vorgang schließt sich die Filterung und Bewertung der Daten an. Für eine Auswertung ist eine Synchronisation des erhaltenen Fingerprints der aufgenommenen Wirkleistung nötig; die Kurven werden auf die dem Lastumschaltersprung folgende abfallende Flanke synchronisiert; der Offset, der aus einem unterschiedlichen Übertragungsverhalten des Getriebezuges resultiert, wird ebenfalls korrigiert. Die Bewertung der Daten beinhaltet eine Anomaliedetektion und Trendanalyse. Bei Abweichungen können vom System entsprechende Meldungen abgesetzt werden. Im Hauptfenster ist der Zustand des Stufenschalters durch eine Kontrollampe dargestellt. Sie kann folgende Zustände annehmen:

- Grün: Funktion des Stufenschalters innerhalb der als zulässig definierten Grenzwerte
- Gelb: Es wurde ein Grenzwert der Kategorie Vorwarnung überschritten.
- Rot: Es wurde ein Grenzwert der Kategorie Warnung überschritten.

2 Auswertung der Wirkleistungskurve

Der Zustandsbeurteilung des Wählers, der Welle und des Getriebes dient die aufgenommene Wirkleistung des Antriebsmotors. Die aufgenommene Wirkleistung ist ein Maß für das aufzuwendende Drehmoment des Motors um den Stufenschalter in Bewegung zu versetzen. Bezüglich der Auswertung gibt es aufgrund des einfachen Meßverfahrens folgende Merkmale zu beachten:

- das Leistungssignal ist mit Rauschen überlagert
- die Signale sind zeitlich nicht synchronisiert
- temperaturabhängige mechanische Widerstände erzeugen einen Versatz bezüglich der Leistungsaufnahme bei gleichen Stufungsvorgängen.

2.1 Signalkonditionierung

Die Signalkonditionierung erfolgt mit Hilfe eines Tiefpaßfilters. Abbildung 2.1 zeigt das ungefilterte Signal (schwarz) und das gefilterte Signal (weiß). Im gefilterten Signal sind deutlich die Einflüsse der unterschiedlichen mechanischen Widerstände, die durch Auf- bzw. Ablaufen der Kontakte und dem Spannen der Federspeicher entstehen, zu erkennen.

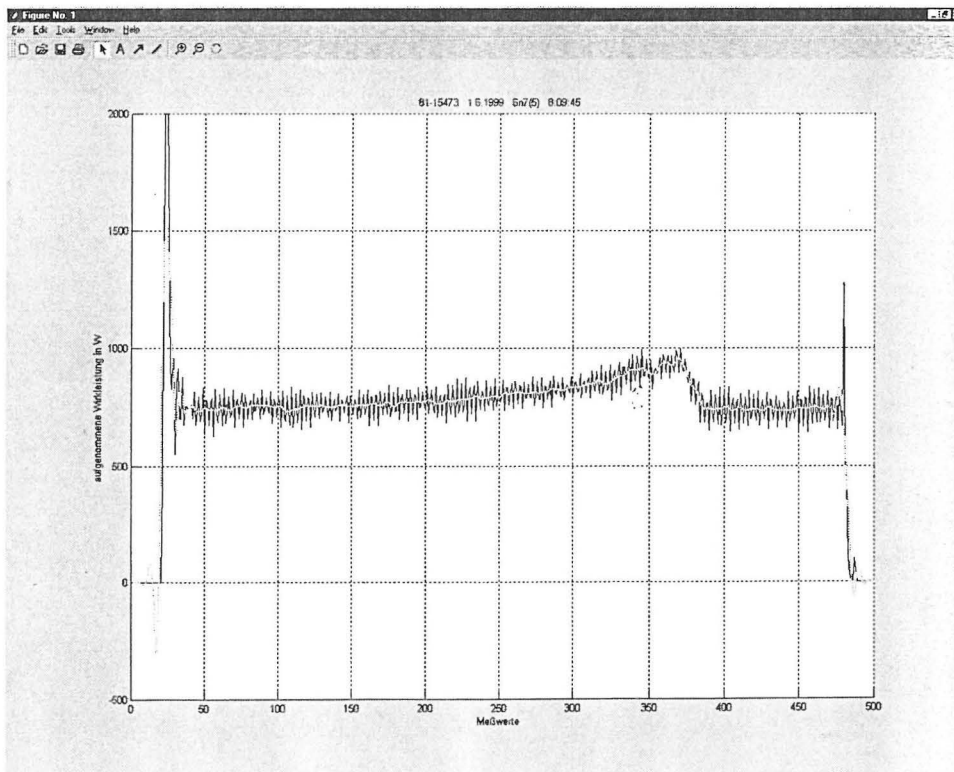


Abbildung 2.1:

ungefiltertes
Leistungssignal
(schwarz) und
gefiltertes Signal
(weiß)

2.2 Auswerteverfahren

Abbildung 2.2 zeigt die aufgenommene Wirkleistung für die Schalthandlung von Stufe 10 nach 11. Die x-Achse stellt die einzelnen Meßpunkte dar. Der Abstand der Meßpunkte beträgt 10 ms. Die y-Richtung gibt die aufgenommene Wirkleistung des Antriebmotors in W wieder. Setzt sich der Antrieb in Bewegung ist zu anfangs eine höhere Leistungsaufnahme zu beobachten (Anlaufstrom). Aufgrund der Tiefpaßfilterung weicht die aufgenommene Leistung im Anlaufmoment bezogen auf die tatsächliche Leistung beträchtlich ab. Diese Abweichung kann jedoch hingenommen werden, da dieser Bereich für die Auswertung der Leistungskurve nicht berücksichtigt wird.

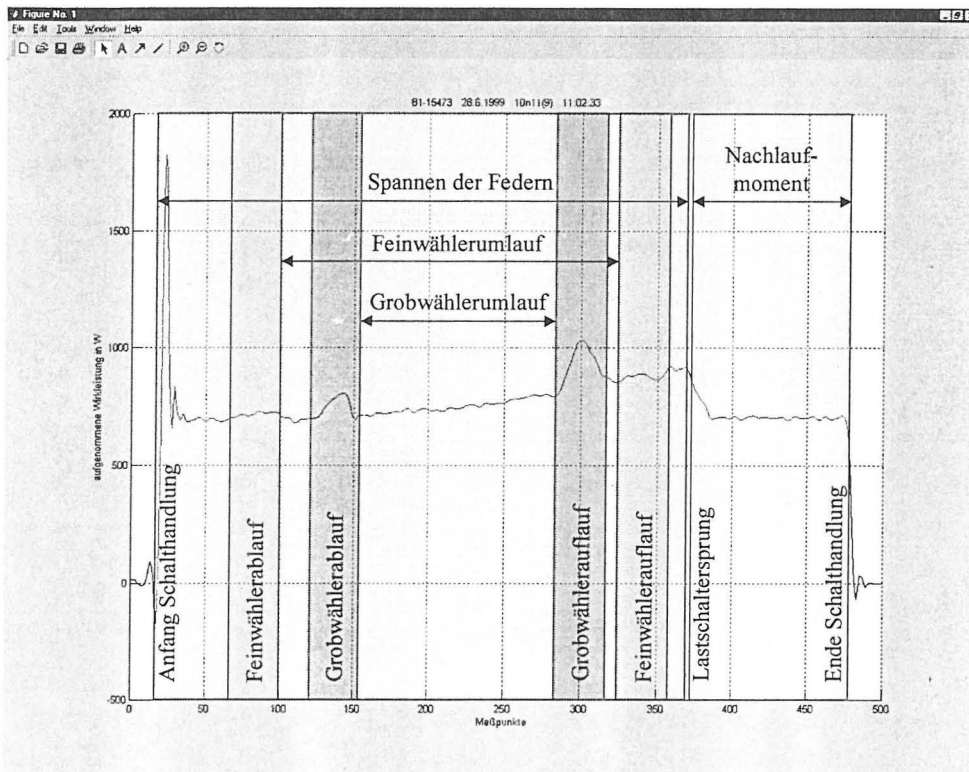


Abbildung 2.2:
Funktionsablauf einer
Schalthandlung

Ist der Antrieb in Bewegung wird eine ansteigende Leistungsaufnahme beobachtet, die aus dem Spannen des Federspeichers des Lastumschalters herrührt. Die Welligkeit der Kurve beruht auf dem Getriebeispiel und dem Auf- bzw. Ablaufen der Kontakte des Fein- oder Grobwählers. Der Leistungssprung zwischen den Meßpunkten 370 und 380 entsteht durch plötzliches Auslösen des Lastumschalters. Die Federn geben ihre gespeicherte Energie ab. Danach läuft der Antrieb weiter bis er endgültig abschaltet. Während des Abschaltvorgangs sind Ausgleichsvorgänge zu beobachten.

Bei einer Auswertung der Leistungskurven sind verschiedene Besonderheiten der Kurven abhängig von den vorausgegangenen Schalthandlungen zu beachten. Abbildung 2.3 zeigt zweimal die Schalthandlung von Stufe 6 nach 7, aber mit unterschiedlicher Vorgeschichte. Die vorausgegangene Schalthandlung der schwarzen Kurve 6n7(5) war von Stufe 5 nach 6; die der grauen Kurve 6n7(7) die Schalthandlung von Stufe 7 nach 6 (Umkehrstufung).

Obwohl beide Schalthandlungen zum gleichen Zeitpunkt beginnen (Meßpunkt 4), ist ein Linksversatz um wenige 10 ms der grauen gegenüber der schwarzen Kurve zu erkennen. Der Grund für diesen Versatz ist im Getriebeispiel zu suchen.

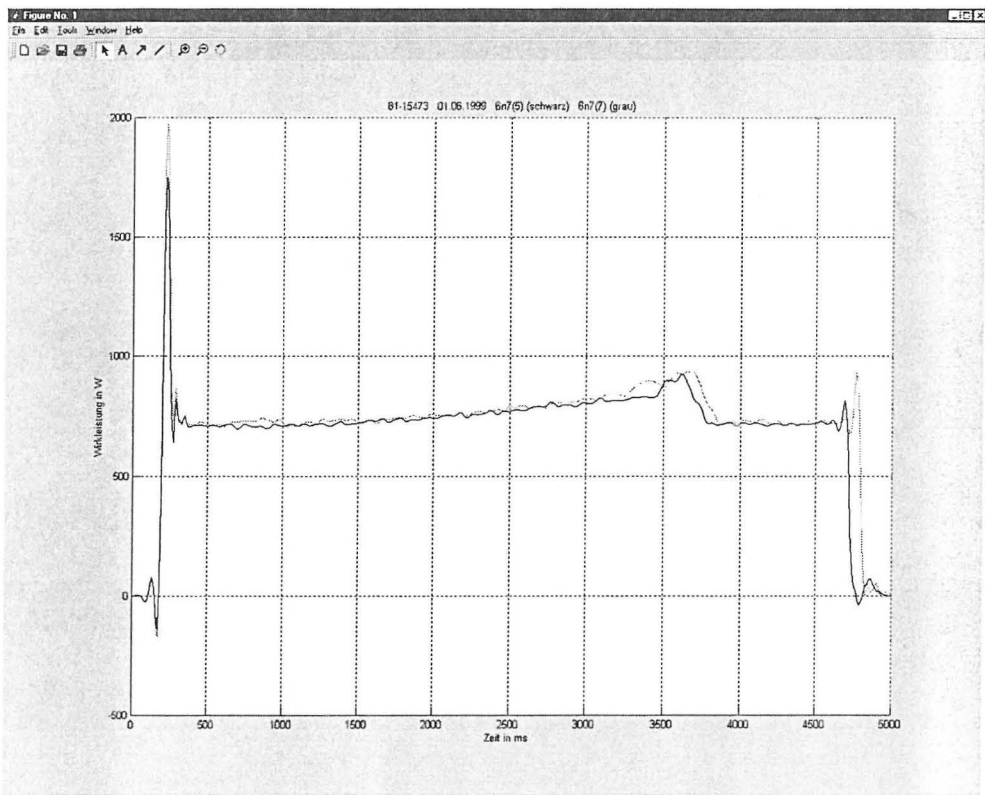


Abbildung 2.3:

Schalthandlung 6n7
mit unterschiedlicher
Vorgeschichte

In Abbildung 2.4 sind die selben Kurven vergrößert dargestellt. Der oben beschriebene Versatz wurde korrigiert. In den Zeitbereichen 400 bis 1100 ms und 3400 bis 3600 ms sind Abweichungen der beiden Kurven sichtbar. Die Kurve der Schalthandlung 6n7(5) zeigt in diesen Bereichen eine ansteigende und darauf wieder abfallende Leistungsaufnahme gegenüber der der Schalthandlung 6n7(7). Die Ursache dieser Abweichungen beruht auf der Mechanik des Stufenschalters. Der Stufenschalter besitzt zwei Wähler. Einer der beiden ist der stromtragende Wähler, der andere wählt dagegen die nachfolgende Stufe an. Im Fall der Schalthandlung 6n7(7) ging dieser die Schalthandlung 7n6 voraus, d.h. es wurde von Strompfad 7 nach Strompfad 6 umgeschaltet. Wird danach auf Strompfad 7 geschaltet – Schalthandlung 6n7 –, so muß der Wähler für den neuen Strompfad nicht bewegt werden, da er schon auf Stellung 7 steht. Da keine Bewegung stattfindet, muß auch keine zusätzliche Leistung dafür aufgebracht werden.

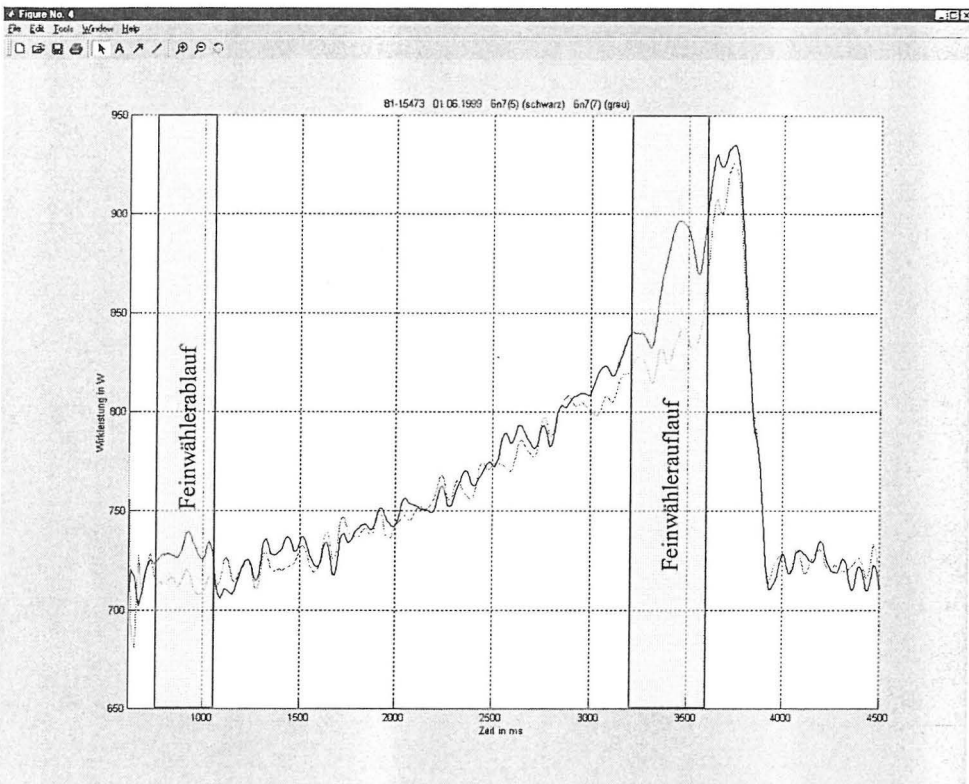


Abbildung 2.4:
Schalthandlung 6n7
mit unterschiedlicher
Vorgeschichte;
synchronisiert.

Für eine korrekte Beurteilung der Leistungskurven muß daher für jede Schalthandlung die Vorgeschichte berücksichtigt werden. Desweiteren müssen sämtliche Kurven synchronisiert werden. Durch das temperaturabhängige Übertragungsverhalten des Wellenzuges und Getriebes entsteht ein Versatz in y-Richtung. Da in bestehenden Stufenschaltern eine vollständige Temperaturmessung nicht nachgerüstet werden kann, wurde bewußt auf eine Temperaturkompensation verzichtet und ein alternatives Verfahren benutzt. Die Idee besteht darin, die aufgezeichnete Kurve einer Schalthandlung auf eine Referenzkurve zu beziehen, wobei der Versatz durch eine weitere Tiefpaßfilterung bestimmt und rechnerisch korrigiert wird. Nachteil dieser Methode ist, daß in dem kleinen Bereich der Temperaturschwankungen eine Schwergängigkeit, die sich in einem Versatz bemerkbar macht, nicht erkannt wird. Neben dem Versatz in Y-Richtung müssen die Kurven auch zeitlich synchronisiert werden. Untersuchungen zeigen, daß eine Synchronisation auf die abfallende Flanke nach dem Lastumschaltersprung bei Meßpunkt 480 vorteilhaft ist.

Reproduzierbarkeitsuntersuchungen zeigen, daß gleiche Stufungsvorgänge auch nach Signalkorrektur eine gewisse Streuung bezüglich der Leistungsaufnahme besitzen. In Abbildung 2.4 ist für die Schalthandlung 6n7(5) das durch die Streuung verursachte Grenzband dargestellt. Hierbei sind die zeitlichen Abschnitte die das Ein- bzw. Ausschalten des Motors betreffen und für den Bewegungsablauf des Stufenschalter irrelevant sind ausgeblendet. Der Ermittlung liegen 50 Meßkurven zu Grunde. Die vertikale Breite der Grenzkurve beträgt durchschnittlich 25 W. Das so ermittelte Grenzband kann für die Bewertung gleicher Stufungsvorgänge als Referenz benutzt werden.

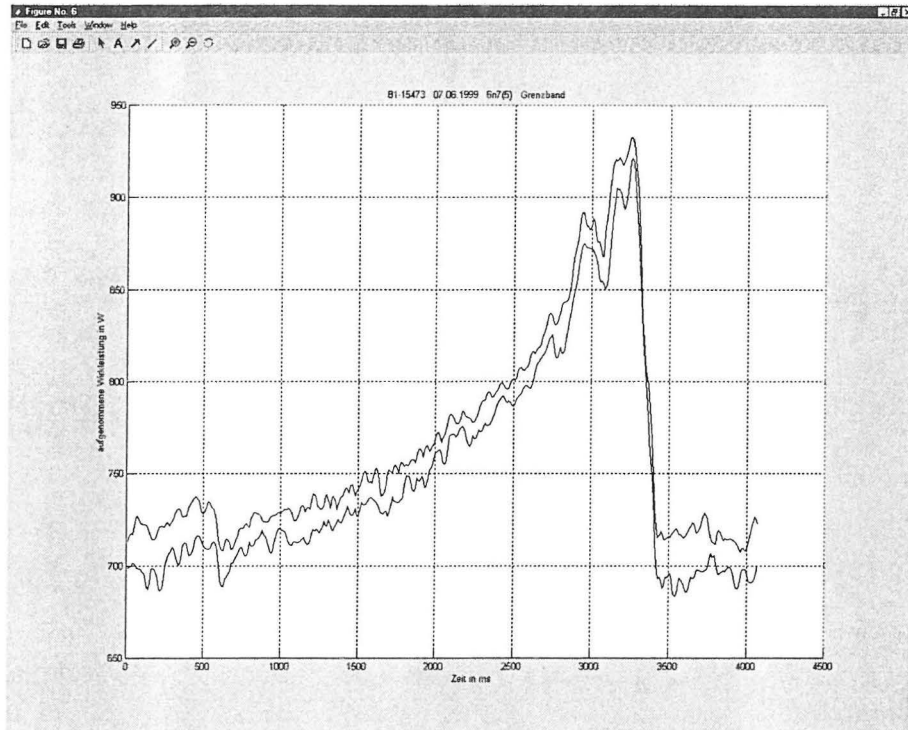


Abbildung 2.4:
Grenzband der
Schalthandlung 6n7(5)

3 Messungen

Beispielhaft für mehrere Fehlermöglichkeiten im Wähler- bzw. Getriebebereiches sei, um die Empfindlichkeit des Systems darzustellen, ein in der Höhe vergrößerter Kontakt herausgegriffen. Die Kontakthöhe der Stufe 7 Phase L2 wurde um einen Millimeter von 12 auf 13 mm vergrößert. In Abbildung 3.1 ist die gemessene Wirkleistungskurve dargestellt. Das entsprechende Grenzband der Schalthandlung 6n7(5) ist grau gezeichnet. Im Zeitbereich 2800 ms bis 3100 ms ist die gesteigerte Leistungsaufnahme bei Auflauf des Wählers auf Stufe 7 erkennbar.

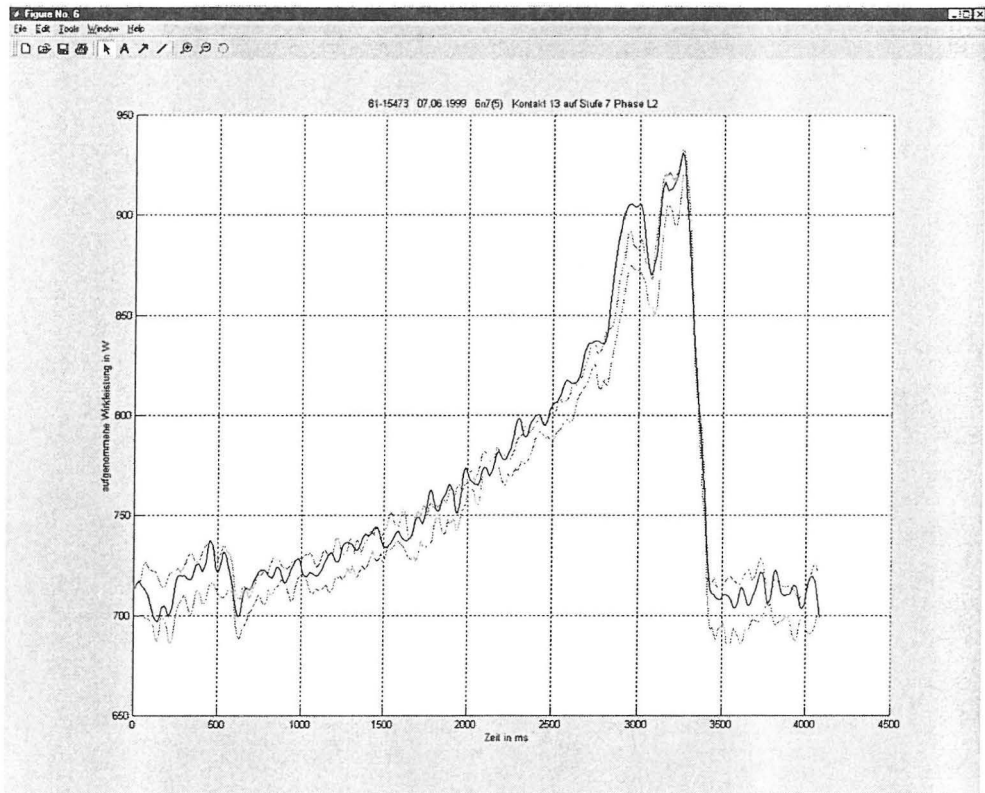


Abbildung 3.1:

Leistungskurve bei
Auflauf auf um 1 mm
vergrößerten Kontakt
auf Stufe 7 Phase L2
und das
entsprechende
Grenzband

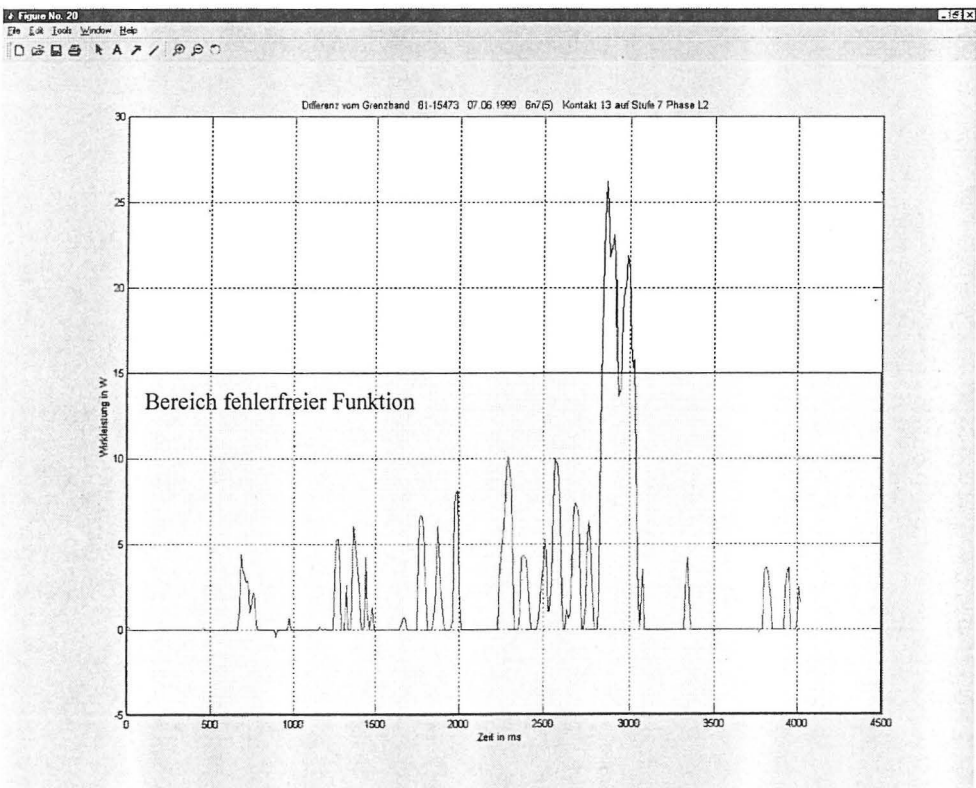


Abbildung 3.2:

Abweichungen der
gemessenen
Wirkleistung vom
entsprechenden
Grenzband

Abbildung 3.2 zeigt die Abweichungen der ermittelten Leistungskurve des vergrößerten Kontaktes gegenüber dem Grenzband deutlicher. Der Einfluß des vergrößerten Kontaktes stellt sich durch eine erhöhte Leistungsaufnahme im Zeitbereich 2800 bis 3100 ms dar.

Die Messung der Wirkleistung wird durch eine Reihe von Fehlerquellen beeinflusst. Es sind das Meßverfahren und vor allem der Synchronisationsalgorithmus zu nennen. Durch eine Erweiterung des Grenzbandes wird der Bereich fehlerfreier Funktion festgelegt (s. Abbildung 3.2).

Die Ermittlung geeigneter Grenzkurven für die einzelnen Zustände der Mechanik (s. Kapitel 1.2 Stufenschalter-Monitoring-Software) sowie umfassende Fehlersimulationen sind Gegenstand weiterer Untersuchungen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das im Beitrag vorgestellte Monitoring-System zeichnet sich dadurch aus, daß es den Zustand des Stufenschalters über sekundäre Größen bewertet. Grund hierfür ist die Unzugänglichkeit des Stufenschalters eines im Betrieb befindlichen Transformators; es können Sensoren nur an die von außen zugänglichen Funktionseinheiten zur Messung angebracht werden.

Das System, das nur die vom Motor aufgenommene Wirkleistung bewertet, zeigte bei Laborversuchen, daß Aussagen über den Zustand des Stufenschalter-Wähler-Bereiches und des Getriebes möglich sind. Das System konnte mechanische Defekte detektieren und bewerten. Die Bewertung erfolgt unter folgender Einteilung:

- Grün: Funktion des Stufenschalters innerhalb der als zulässig definierten Grenzwerte
- Gelb: Es wurde ein Grenzwert der Kategorie Vorwarnung überschritten.
- Rot: Es wurde ein Grenzwert der Kategorie Warnung überschritten.

Weitere Laborversuche an im Betrieb befindlichen Transformatoren zur Bestimmung der praxisrelevanten Grenzwerte und einer darauf beruhenden Bewertung des Zustandes sind erforderlich.

Zukünftige Untersuchungen bezüglich der Bestimmung des Übertragungsverhaltens des Getriebes und Wellenzuges müssen zeigen, ob eine Temperaturmessung nötig ist um den Versatz der Leistungskurven zu korrigieren

Eine Erweiterung des Systems kann durch die Aufnahme der Bestimmung des Kontaktabbrandes des Lastumschalters erfolgen. Ein Weg hierzu wäre die Messung des Laststromes während des Schaltvorganges.

Eine Zustandsanalyse des Lastumschalteröls mittels Sensoren würde weitere wichtige Informationen liefern.

Die Schwierigkeiten für eine Zustandsbewertung bei im Betrieb befindlichen Transformatoren besteht darin, daß es sehr unterschiedliche Fabrikate und Typen von Stufenschaltern gibt. Jeder Stufenschalter verhält sich anders, so daß es keinen einheitlichen Weg gibt, deren Zustand zu bewerten. Außerdem müssen die im Labor gefundenen Modelle ihre Tauglichkeit in der Off- oder On-Line-Messung unter Beweis stellen.