Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 80 (1989)

Heft: 7

Artikel: Faseroptische Messung des Temperaturprofils einer Transformatormodellspule

Autor: Schad, H. / Boss, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903664

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Faseroptische Messung des Temperaturprofils einer Transformatormodellspule

Hp. Schad und P. Boss

Das Anwendungsgebiet von Glasfasern beschränkt sich nicht auf die Kommunikationstechnik. Dieser Beitrag beschreibt ein faseroptisches, verteiltes Temperaturmesssystem, mit dem das Temperaturprofil der Leiterwicklungen einer Modellspule unter Betriebsbedingungen gemessen wurde. Diese Spule wurde aus einem neuartigen, kombiniert faseroptischen und elektrischen Leiter gewickelt. Die gemessene Temperaturverteilung entspricht völlig dem Wicklungsschema dieser Spule und zeigt auch das erwartete Temperaturgefälle verursacht durch thermische Konvektion.

Un système de mesure à fibre optique permettant de déterminer le profil de température le long d'un enroulement a été développé. Des essais, exécutés sur un modèle réalisé à partir d'un nouveau type de conducteur hybride comprenant une fibre optique intégrée, ont permis de relever la distribution de température de façon précise à l'intérieur de l'enroulement et de mettre en évidence les gradients thermiques en présence dans ce type de bobinage.

Adresse der Autoren

Dr. *Hanspeter Schad*, dipl. Phys. ABB, Asea Brown Boveri AG, Forschungszentrum und *Pierre Boss*, El.-Ing., ABB Sécheron AG, 1211 Genf.

Faseroptische Sensoren besitzen im Vergleich zu konventionellen Sensoren ausserordentliche Eigenschaften, wie z.B. die elektrische Isolationseigenschaft und die Immunität gegen elektromagnetische Störungen. Des weiteren bietet die eindimensionale, dünne, flexible optische Faser die einzigartige Möglichkeit, die Verteilung einer Messgrösse entlang ihrer linearen Ausdehnung zu messen, wenn diese Messgrösse eine intrinsische Fasereigenschaft geeignet moduliert. Somit kann mit einem einzigen entsprechend angebrachten Sensor das komplette Profil einer Messgrösse beobachtet und damit eine grosse Anzahl der sonst nötigen diskreten Sensoren ersetzt werden.

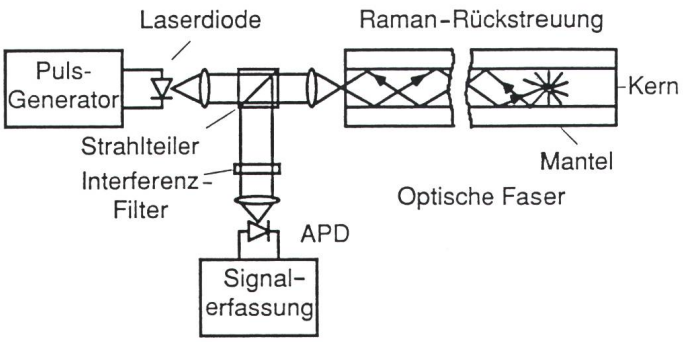
Eines der wichtigsten Systeme dieser Art ist der verteilte Temperatursensor (DTS, Distributed Temperature Sensor), der auf der zeitaufgelösten Erfassung der Raman-Rückstreuung des in der Faser geführten Lichts beruht [1;...;4]. Einzigartig ist die Einsatzmöglichkeit dieses faseroptischen, verteilten Temperatursensors in der elektromagnetisch rauhen und unwirtlichen Umgebung der Transformatoren, Generatoren, Drosselspulen, der elektrischen Energieerzeugung und -verteilung.

Es ist bekannt, dass die Lebensdauer eines Leistungstransformators hauptsächlich durch heisse Stellen, die sog. Hot Spots, bestimmt ist [5;...;7]. Da deren genaue Position nur schwer vorausgesagt werden kann, führt eine auf einzelne Punkte beschränkte Temperaturüberwachung zu begrenzten Resultaten. Die meisten Transformatoren werden deshalb weit unter ihrer maximalen Toleranztemperatur betrieben. Könnten die Temperaturwerte jedoch entlang der kompletten Wicklung des Transformators – für die Konstruktion oder den permanenten Gebrauch – bestimmt werden, so könnte die Betriebstemperatur erhöht und der Wirkungsgrad der Transformatoren gesteigert werden. Das bedeutet, dass mit demselben Transformatortyp eine höhere Leistungsklasse erreicht oder dass für einen bestimmten Leistungsbedarf ein kleinerer Transformator eingesetzt werden könnte.

Das kontinuierliche Registrieren von Temperaturverteilungen ist aber nicht nur eine Voraussetzung für die Erfassung von Hot Spots, sondern ist auch von grossem Interesse bei der Entwicklung und Konstruktion der Transformatoren. Zum Beispiel ist für die Analyse der Wärmeleitung und der Wärmekonvention ein kompletter Satz der Temperaturwerte und ihrer Gradienten nötig. Auch kann das verteilte Temperaturmesssystem bei der Führung von Prozessen, bei Alarmanwendungen (Feuerschutz in Gebäuden, Bergwerken und Schiffen) und in der Nahrungsmittelindustrie, Ölindustrie und chemischen Industrie eingesetzt werden.

Messprinzip

Im Hinblick auf einen optimalen Einsatz bei elektrischen Maschinen hoher Leistung wurde das nachfolgend beschriebene Arbeitsmodell eines DTS entwickelt. Der prinzipielle Aufbau besteht aus einer optischen Einheit, einer elektronischen Einheit, einem digitalen Oszilloskop und einem portablen Computer, der zur Signalauswertung, zur grafischen Darstellung und zur Dokumentation des gemessenen Temperaturprofils dient. Das Messprinzip ähnelt dem eines konventionellen OTDR (Optical Time Domain Reflectometer, Fig. 1), wobei jedoch anstatt der elastischen Rayleighstreuung der viel schwächere Anteil der inelastischen Ramanstreuung im rückgestreuten Licht detektiert wird. Der Ramanstreubereich im Bereich grösserer Wellenlängen, d.h. kleinerer Energie, wird als Stokes bezeichnet und im Be-



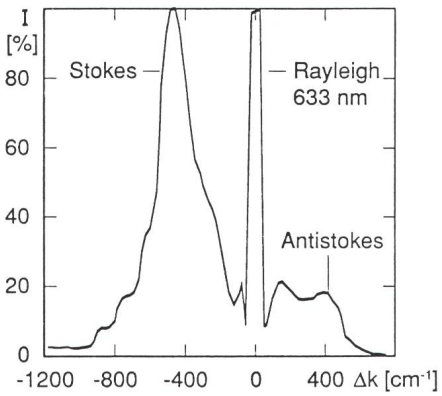
Figur 1
Optisches Prinzip des DTS-Systems
DTS
Distributed Temperature Sensor
APD
Avalanche Photodiode

reich kleinerer Wellenlängen als Antistokes. Allgemein wird diese Art von Thermometrie als *Raman-Ratio-Thermometrie* bezeichnet [3].

Die Ramanbanden der verwendeten optischen Multimode-Faser (100/140 µm) zeigt die Figur 2. Sie wurden bei Raumtemperatur mit einem speziellen Messaufbau [8], der in der Lage ist, die Rayleighstreuung zu unterdrücken, bestimmt. Entsprechend den Maxima der Antistokes- (positive Wellenzahlen, höhere Energie und damit kürzere Wellenlänge) und Stokesbanden (negative Wellenzahlen) wurden für das Arbeitsmodell geeignete Interferenzfilter zum Ausfiltern der entsprechenden Ramanbanden ausgewählt und in einen Filterwechsler montiert, der vom Computer aus gesteuert werden kann. Bekanntlich hängt die Rückstreuintensität der Antistokesbanden stark von der Temperatur ab, die der Stokesbanden hingegen nicht. Das Verhältnis der beiden ist eine nahezu rein temperaturabhängige Grösse, da der Dämpfungseinfluss entlang der optischen Faser dadurch eliminiert wird. In Figur 3 ist die Eichkurve wiedergegeben, die mit dem Arbeitsmodell zwischen 20–200 °C aufgenommen wurde. Durch geeignete Wahl der spektralen Parameter der Interferenzfilter ist zusammen mit der Wellenlängenabhängigkeit der Avalanche-Photodiode (APD) eine ausgezeichnete Linearität zu erzielen, wie die durchgezogene Kurve, gewonnen durch lineare Ausgleichsrechnung, beweist. Die Genauigkeit der Temperaturmessung beträgt ±5 °C und die Auflösung ±2 °C.

Örtliche Auflösung	±1 m
Temperaturauflösung	±2 °C
Temperaturgenauigkeit	±5 °C
Temperaturbereich	0–200 °C
Faserlänge	1000 m

Tabelle I: Daten des Arbeitsmodells



Figur 2 Ramanspektrum der Sensorfaser bei 23 °C
I Intensität *Δk* Wellenzahldifferenz

Die örtliche Auflösung der Temperaturmessung erhält man aus einer Zeitmessung. Hierzu wird wie beim OTDR die Laufzeit eines Lichtimpulses ausgenutzt, der sich in der optischen Faser mit einer Geschwindigkeit von 0,2 m/ns ausbreitet. Die untere Grenze der Ortsauflösung ist durch die Pulsbreite gegeben. Wir verwenden eine GaAs-Laserdiode, die durch Temperaturvorgabe auf eine Emission von 904 nm abgestimmt ist, eine eingekoppelte Lichtpulsleistung von 1 W und eine Pulsbreite von 10 ns aufweist. Dies entspricht einer Ortsauflösung von einem Meter, wenn man Hin- und Rückweg beachtet. Das Abtastintervall des D/A-Wandlers ist mit 5 ns kurz genug und die Bandbreite der Verstärkung mit 100 MHz ausreichend hoch, so dass hierdurch keine zusätzlichen Begrenzungen entstehen. Die Daten des Arbeitsmodells sind in der Tabelle I zusammengestellt.

Elektrischer Leiter mit integrierter optischer Faser

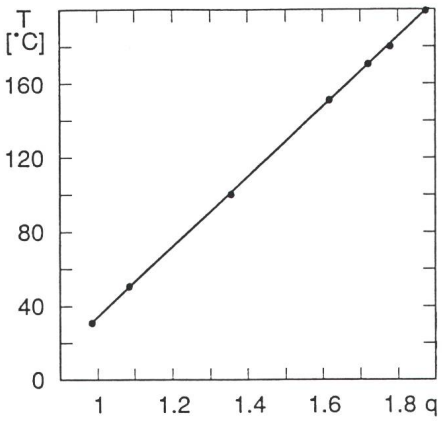
Voraussetzung für eine Hot-Spot-Detektion ist das direkte Einbringen der Sensorfaser in die elektrische Wicklung – z. B. bis unter die Papierisolation – schon während der Herstellung der Spule. Deshalb haben ABB Sécheron und Asta (Öd, Österreich) vereinbart, einen neuen, hybriden optisch-elektrischen Leiter zu entwickeln. In einem ersten Schritt wurde ein Verfahren zum Einbringen der optischen Faser während der Isolation des Kupferdrahtes erprobt. Vor der Umwicklung des Kupferdrahtes mit Papier wurde die Faser in eine Nut im Draht eingelegt und so vor einer Beschädigung bei den verschiedenen Wickelprozessen geschützt. Mit einem konventionellen OTDR wurde dieser Prozess kontrolliert. Die geometrische Form dieses hybriden Leiters zeigt die Figur 4.

Modellspule

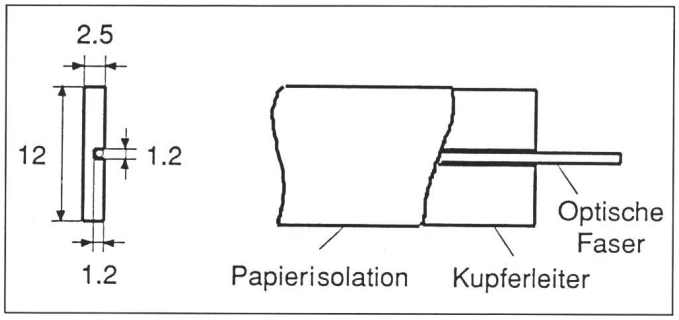
Die Wicklung eines hybriden Leiters zur Modellspule wurde bei ABB Sécheron erfolgreich ausgeführt. Der Spulentyp, eine luftgekühlte Drosselspule, trägt die Bezeichnung GC 4. Die Figur 5 zeigt das Wicklungsschema und Figur 6 ein Foto der Spule. Diese besteht aus 22 Wicklungslagen mit 12 Windungen in jeder Schicht. Der Aussendurchmesser beträgt 0,39 m, der Innendurchmesser 0,3 m und die Höhe 0,36 m. Die gesamte Leiterlänge, optisch wie elektrisch, beträgt 286 m, was für jede Schicht eine Länge von 13 m bedeutet.

Messergebnisse und Diskussion

Ausgehend von einer Temperatur von 23 °C wurde die Spule durch einen Betriebsstrom von 65 A für zwei Stunden aufgeheizt und das Temperaturprofil in Intervallen von 5 bis 10 min gemessen. Zu Vergleichszwecken wurden 5 konventionelle Temperatursensoren (Pt100) an verschiedenen Stellen angebracht (ohne die Papierisolation zu entfernen), deren Temperaturwerte mit einem mikroprozessorgesteuerten



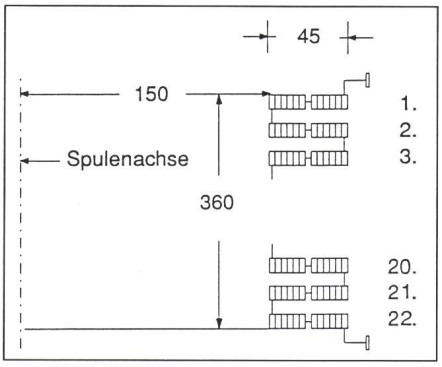
Figur 3 Temperatureichkurve des Arbeitsmodells
Die durchgezogene Kurve basiert auf einer linearen Ausgleichsrechnung.



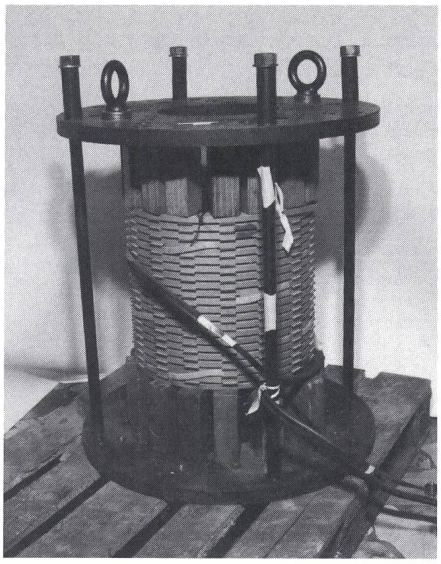
Figur 4 Bemassung des hybriden elektrisch-optischen Leiters

Gerät erfasst und über eine optische RS232-Verbindung zur Messstation übertragen.

Das Temperaturprofil, aufgenommen mit dem Arbeitsmodell nach zwei Stunden Betrieb der Spule, ist in Figur 7 wiedergegeben. Um für die einzelnen Temperaturwerte eine Zuordnung zu der Position innerhalb der Wicklung zu demonstrieren, wurde das Windungsschema ebenfalls miteingezeichnet. Man erkennt eine ausgeprägte Temperaturmodulation periodisch mit zwei Windungslagen. Das zeigt, dass die Schichten sich paarweise thermisch sehr ähnlich verhalten. Der Modulationshub ist etwa 40 °C, entsprechend der Differenz zwischen der höchsten Temperatur im Inneren der Windung (maximal 160 °C) und der äusseren Oberfläche der Spule. Die geringe Temperaturabnahme zur inneren Spulenoberfläche hin wird ebenfalls beobachtet. Ein thermischer Effekt, verursacht durch den kleinen Luftspalt in der Mitte einer jeden Schicht, kann jedoch nicht mehr aufgelöst werden.



Figur 5 Wicklungsschema der Modellspule
22 Lagen



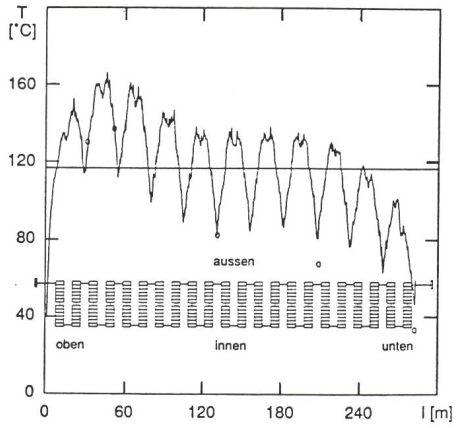
Figur 6 Foto der Modellspule

Die maximalen Temperaturwerte (gleichzusetzen mit den Hot Spots) werden bei der Modellspule in der 4. Lage erreicht. Allgemein fällt die Temperatur von oben nach unten, verursacht durch thermische Konvektion. Die Übereinstimmung zu den diskret bestimmten Temperaturwerten (offene Kreise in Figur 7) ist ziemlich gut, ausser an Stellen mit starkem Temperaturgradienten. Dies weist darauf hin, dass die eigentlichen «Kupferleiter-Temperaturen» drastisch von den Oberflächenwerten, gemessen an der Isolation, abweichen können.

Die Durchschnittstemperatur von 117 °C (angezeigt durch eine durchgezogene Linie in Figur 7) wurde durch eine unabhängige Methode gewonnen. Hierbei wird die Versorgungsspannung abgeklemmt und durch die 4-Leiter-Widerstandsmethode der ohmsche Widerstand der Spule extrapoliert auf den Ausschaltzeitpunkt bestimmt. Da die Temperaturabhängigkeit der metallischen Leitfähigkeit bekannt ist, kann man damit einfach die Durchschnittstemperatur des gesamten Drahtes ermitteln. Dieser Wert ist in guter Übereinstimmung zum errechneten Integral über die Temperaturverteilung.

Schlussfolgerung

Das in diesem Artikel beschriebene System zur verteilten Temperaturmessung hoher Ortsauflösung hat in einem ersten Anwendungsbeispiel seine ausserordentliche Bedeutung bei der Erfassung von Temperaturprofilen bewiesen, wobei diese durch Temperaturgradienten, unvorhersehbare Positionen von Hot Spots oder ausgeprägte Modulationen entsprechend den Wicklungsformen gekennzeichnet sein können. Dieses Arbeitsmodell kann nicht nur zur Entwicklung und zur Konstruktion von Spulenwicklungen aller Art eingesetzt werden, sondern auch zur kontinuierlichen Überwachung von Leistungstransformatoren.



Figur 7 Gemessenes Temperaturprofil der Modellspule

Zur Verdeutlichung wurde das Wicklungsschema der Spule mit in die Figur eingezeichnet. Die waagrechte Linie entspricht dem Temperaturmittelwert von 117 °C, und die Kreise entsprechen den diskret mit Pt100-Fühlern gewonnenen Temperaturwerten.

Literatur

[1] *A.H. Hartog, A.P. Leach* and *M.P. Gold:* Distributed temperature sensing in solid-core fibres. Electronics Letters 21(1985)23, p. 1061 ... 1062.

[2] *J.P. Dakin* a.o.: Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector. Electronics Letters 21(1985)13, p. 569 ... 570.

[3] *J.P. Dakin* a.o.: Temperature distribution measurement using Raman ratio thermometry. Proceedings of SPIE (The International Society for Optical Engineering) volume 566: Fiber optic and laser sensors III, p. 249 ... 253.

[4] *J.P. Dakin:* Temperature measuring arrangement. UK Patent Application GB 2 140 554 A, 28 Nov. 1984.

[5] *W. Lampe e.a.:* Mesures de point chaud dans les transformateurs de puissance. Rapport CIGRE 12-02, 1984.

[6] Optical temperature sensors for transformers. EPRI EL-4376, Project 1137-1, final report. Palo Alto / California, Electric Power Research Institute, January 1986.

[7] *A.J. Wakeling:* Hotspot determination. CIGRE SC 12: Power Transformers. Colloquium-discussion: Diagnostic methods for transformers in service. Helsinki, June 24 ... 27, 1985.

[8] *R. Kirchhofer* und *H.P. Schad:* Anordnung zur zeitlich aufgelösten optischen Rückstreumessung an Lichtwellenleitern. Deutsche Offenlegungsschrift DE 3627198 A 1, 18.2.1988.

Von der Auswahl des geeigneten Materials bis zum einbaufertigen Teil Ihr Spezialist:

Kunststoffe
Elastomere
Herstellung
einbaufertiger Teile

Elektrotechnik
Dämmtechnik
Dichtungstechnik
Arbeitsschutz

Wachendorf

Wachendorf AG
Technische Industrieprodukte
Auf dem Wolf 10 · 4002 Basel
Telefon 061–53 30 30/42 90 90
Telex 962 225
Fax 061–41 44 63

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) ein entscheidendes Qualitätskriterium für elektronische Apparate und Anlagen

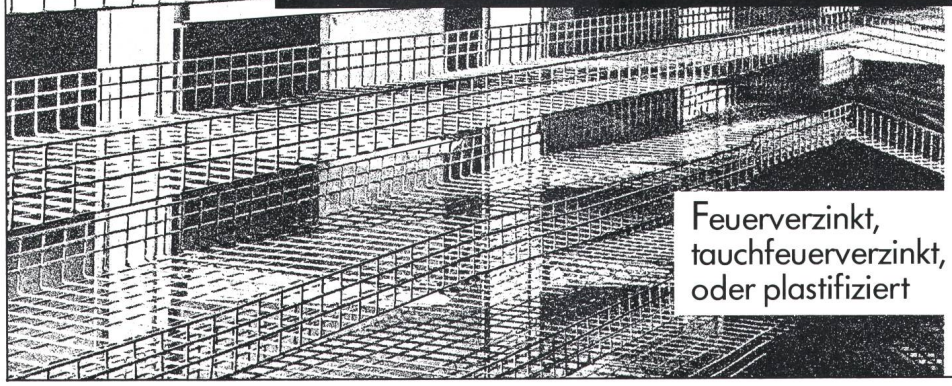
Unser Entstörungslabor

- prüft die Störempfindlichkeit und das Störvermögen,
- bestimmt Störschutz- und Schirmmassnahmen,
- kontrolliert Apparate und Anlagen auf Einhaltung der gesetzlichen Störschutzbestimmungen,
- führt Prototyp- und serienmässige Entstörungen aus,
- steht Fabrikations- und Importfirmen für fachmännische Beratung in EMV-Problemen zur Verfügung.

PRO RADIO-TELEVISION, Entstörungslabor, 3084 Wabern, Telefon 031 / 54 22 44

Gitter-Kabelbahnen

51



ab Lager lieferbar

Feuerverzinkt,
tauchfeuerverzinkt,
oder plastifiziert

Bruno Winterhalter AG
Industrieprodukte Tel. 01-830 50 30
Birgistr. 10, 8304 Wallisellen, Fax 01-830 79 52